

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Octubre 2011 InvestigacionyCiencia.es
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN
COSMOLOGÍA
¿Existe el multiverso?
ZOOLOGÍA
Hormigas nómadas en la jungla
NEUROCIENCIA
Bases cerebrales del aprendizaje
MEDICINA
Combatir la fibrosis quística
Cristales gigantes
Las cuevas de Naica albergan un bosque mineral de gran belleza e interés geológico
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
CRISTALES GIGANTES | ¿EXISTE EL MULTIVERSO? | FIBROSIS QUÍSTICA
OCTUBRE 2011 N.º 421
00421
9 770210 136004
6,00 EUROS



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Octubre 2011, Número 421

ARTÍCULOS


8


34


90

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

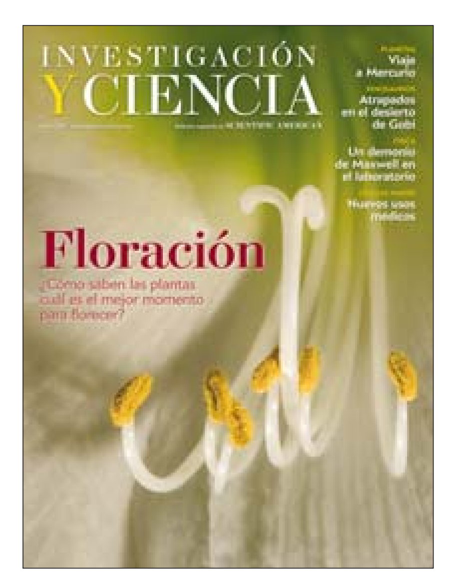
SECCIONES

EN PORTADA

Las cuevas de Naica, en México, esconden una de las formaciones geológicas más peculiares de la Tierra: cristales de yeso descomunales, cuyas dimensiones llegan a superar los diez metros. Su crecimiento fue posible gracias a que las condiciones adecuadas de temperatura, humedad y saturación se mantuvieron extremadamente estables durante miles de años. Fotografía cortesía de La Venta y C/Producciones.



redaccion@investigacionyciencia.es



Mayo 2011

ÁTOMOS FRÍOS

En «Demonios, entropía y la búsqueda del cero absoluto» [Investigación y Ciencia, mayo de 2011], Mark G. Raizen describe experimentos en los que una puerta láser de un solo sentido reduce el volumen de un gas y, por tanto, su entropía disminuye sin que aumente su temperatura. Raizen señala que la disminución de entropía puede entenderse al considerar cómo se reparte la información. Sin embargo, esa explicación es innecesaria. La construcción de los láseres, la energía que consumen y el resto del montaje de la prueba contribuyen, en conjunto, a un aumento considerable de la entropía. Este incremento debe tenerse en cuenta y, a todas luces, compensa la disminución de entropía que se produce en el experimento. No hacen falta flujos de información para explicar ese decremento.

Michael Bookbinder
New Canaan, Connecticut

Responde Raizen: *El sistema objeto de nuestro experimento consistía en un conjunto de átomos confinados en un recipiente y en interacción con un haz láser. Solo nos interesa el cambio de entropía que tal interacción produce. Se trata de un procedimiento habitual en termodinámica; no es preciso tener en cuenta la entropía que intervino en la producción del láser.*

ESPECIES Y ORGANISMOS

No es mi intención poner en duda la claridad de las ideas expuestas en «El último gran calentamiento global», de Lee R. Kump [Investigación y Ciencia, septiembre de 2011]. Sin embargo, deseo hacer referencia a la forma en que las ideas y los conocimientos se trasladan al gran público; en particular, lo que considero una difusión equívoca de uno de los conceptos básicos de la teoría de la evolución: explicarla como la adaptación al medio de los organismos. Por ejemplo, en un párrafo del artículo, leemos: «Las zonas climáticas se desplazaron hacia los polos, por lo que los seres vivos marinos y terrestres hubieron de emigrar, adaptarse o morir».

Como contraejemplo, Jordi Izquierdo describe en «Otras medidas para controlar las malas hierbas» [Investigación y Ciencia, julio de 2011] cómo los herbicidas acaban con la casi totalidad de las malas hierbas: las que quedan son resistentes. Los organismos no evolucionan para adaptarse al medio, sino que prosperan los que ya están adaptados.

De lo que se trata es de la evolución de la especie, de los descendientes modificados; no del organismo. La modificación genética que permite la adaptación se produce antes que el cambio en el medio. Si sucediera al revés, los organismos sucumbirían antes de poder adaptarse. Además, solo algunas modificaciones genéticas permiten la supervivencia en el nuevo entorno, así que no se trata de que los descendientes «adivinen» como será el nuevo medio, sino que es el azar lo que determina qué modificaciones resultarán útiles en un momento dado.

Rafael Claver



Septiembre 2011



Julio 2011

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, Pral. 1ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Errata corrige

Como apunta nuestro lector Eduard Baldú, en el artículo «Se equivocó la paloma», del pasado mes de julio, la anchura correcta del local que se menciona en el último problema de la pág. 92 debe ser de 2 metros en lugar de 3 (y las nueve divisiones posteriores, de 2 por 1). Por otro lado, como nos indica Balere Barrero, en la columna «¿Qué es un poliedro?», del número de septiembre, en la figura de la pág. 91 los rótulos del dodecaedro y del icosaedro aparecen intercambiados.

Apuntes

ASTRONOMÍA

La eterna juventud de las estrellas

Al igual que a tanta gente, a algunas estrellas no les agrada revelar su edad: a menudo, las estrellas viejas aparentan menos edad de la que en realidad tienen. Esto supone un inconveniente para quienes buscan exoplanetas habitables, ya que existe una correlación entre la edad de una estrella y las formas de vida que podrían darse en sus inmediaciones.

«Sabemos que si la estrella y el planeta tienen unos mil millones de años de antigüedad, solo puede existir vida microbiana primitiva», explicaba Søren Meibom, del Centro de Astrofísica Harvard-Smithsoniano, durante un congreso de la Sociedad Astronómica Americana celebrado en Boston el pasado mayo. «¿Tiene 4600 millones de años? Entonces podríamos estar ante un planeta rebosante de vida compleja e inteligente.»



Pero las estrellas no solo no vienen con certificado de nacimiento, sino que, además, muchas de sus características visibles permanecen invariables a lo largo de la mayor parte de su vida. Sin embargo, existe una propiedad que sí se muestra sensible a la edad del astro: a medida que este envejece, disminuye la velocidad de rotación sobre su propio eje. Según Meibom, es posible emplear dicha magnitud como un reloj para medir la edad estelar.

El problema reside en que alguien debe dibujar los números sobre la esfera de ese reloj. Los investigadores ya han identificado una relación entre la velocidad de rotación y la edad en el caso de estrellas muy jóvenes. Ahora, Meibom y sus colaboradores se encuentran estudiando el caso de los astros de mayor edad. Si consiguen descifrarlo, será mucho más sencillo estimar la edad de una estrella... aun sin certificado de nacimiento.

—John Matson

FÍSICA

Un misterio en un cristal

El hecho de que los estudiantes hagan crecer cristales en sus proyectos de ciencias quizá nos lleve a pensar que los físicos conocen a la perfección la manera en que se forman y se deshacen estas estructuras tan elegantes. Por desgracia, los libros de texto aún exhiben una gran laguna allí donde debería explicarse la fusión de un cristal. «La razón por la que una estructura cristalina se funde es muy sutil», afirma Georg Maret, de la Universidad de Constanza, quien este año recibió el premio Gentner-Kastler, otorgado por la Sociedad de Física Alemana y la Sociedad de Física Francesa, por haber aclarado parte del enigma.

La dificultad estriba en que los cristales se estabilizan a sí mismos: cuando un átomo sale de su lugar, los átomos circundantes lo fuerzan a volver a su posición original. Incluso si el átomo vibra lo suficiente como para liberarse, ¿adónde podría ir? Sus vecinos bloquean las rutas de escape. Para que un cristal pase al estado líquido, se diría que hace falta una especie de inteligencia colectiva que mueva a todos los átomos al mismo tiempo.

Para entenderlo, los físicos han estudiado los cristales bidimensionales. En sentido estricto, estas estructuras no existen en la naturaleza, aunque algunas películas de aceite flotando sobre el agua se asemejan bastante a este modelo teórico. En la década de los setenta, los físicos teóricos se dieron cuenta de que los cristales planos se mostraban menos estables que sus análogos tridimensionales. Debido a que cada átomo se halla rodeado por un número menor de vecinos, las fuerzas que lo mantienen en su lugar son más débiles. Y cuando uno de ellos vibra hasta liberarse, son menos los átomos que han de apartarse para dejarle paso. Por estas y otras razones geométricas, se piensa que los cristales bidimensionales deberían fundirse en dos etapas: antes de derretirse por completo, pasarían por una *fase hexática*, en la que grupos hexagonales de átomos fluyen con libertad, como en un fluido, pero siguen orientados en una misma dirección, como en un cristal.

Se ha tardado treinta años en comprobar esta teoría. A fin de modelizar un cristal, el equipo de Maret construyó una especie de mecano donde el papel de átomos lo desempeñaban bolas de un micrómetro de diámetro, fabricadas con una mezcla de plástico y óxido de hierro y suspendidas en un fluido. Aunque su tamaño superaba con creces al de un átomo, las bolas eran lo bastante pequeñas como para comportarse de forma similar: vibraban de manera aleatoria y, al ser sometidas a la acción de un campo magnético externo, ejercían fuerzas magnéticas unas sobre otras. Aumentar la intensidad del campo magnético era análogo a bajar la temperatura, pues las bolas se acomodaban para formar una red cristalina. «El trabajo de Maret permite estudiar la forma en que un cristal pasa de sólido a hexático y de hexático a líquido», afirma David R. Nelson, de la Universidad de Harvard, quien ayudó a desarrollar la teoría que Maret acaba de confirmar.

Los mismos principios de comportamiento colectivo deberían ayudar a desentrañar el enigma, mucho más complejo, de los cristales tridimensionales.

—George Musser



Cristales de amatista

CORTESÍA DE NASA, ESA Y AURA/CALTECH (*estrellas*); PHOTO RESEARCHES, INC. (*cristales*)

MATEMÁTICAS

La empatía de los salmones... o el significado de las estadísticas

Si desea convencer al mundo de que un pez puede percibir nuestras emociones, quizá le baste un solo parámetro estadístico: el valor *p*.

El valor *p* es una herramienta multiuso que suele emplearse para determinar si un resultado experimental posee o no valor estadístico. Por desgracia, el método no es infalible, por lo que en ocasiones se interpretan de manera incorrecta observaciones que, en realidad, no se deben sino a fluctuaciones estadísticas carentes de sentido.

Imaginemos que se desea comprobar la eficacia de un fármaco que, supuestamente, disminuye el riesgo de sufrir un infarto. A tal fin, se lleva a cabo un estudio en el que se comparan los efectos del medicamento frente a los de un placebo y, al finalizar, se observa que quienes tomaron la medicina sufrieron menos ataques cardíacos que aquellos a quienes se les administró el placebo. ¿Quiere eso decir que el fármaco prevenía el infarto?

Quizá no. El fármaco podía haber sido completamente inactivo, en cuyo caso habría existido una probabilidad del 50 por ciento de que quienes lo tomaron padeciesen menos infartos que quienes fueron tratados con el placebo. A fin de cuentas, en alguno de los dos grupos tenía que haber menos infartos que en el otro.

El valor *p* cuantifica la probabilidad de obtener un resultado experimental positivo cuando la hipótesis de trabajo es errónea. Un criterio de corte empleado en numerosas disciplinas establece que, si el valor *p* es inferior a 0,05, el resultado se considera estadísticamente significativo. Pero, tal y como ocurre con cualquier convención arbitraria, también esta puede arrojar conclusiones falsas, puesto que, en promedio, obtendremos un valor *p* inferior a 0,05 una vez de cada veinte. Por tanto, todo estudio que efectúe veinte comparaciones obtendrá de media un resultado «estadísticamente significativo».

Numerosos estudios realizan veinte, cuarenta o incluso cientos de análisis. En tales casos, los investigadores que no ajusten en consecuencia el umbral de 0,05 para el valor *p* tienen prácticamente garantizado hallar resultados estadísticamente significativos. Un trabajo publicado en febrero en el *American Journal of Clinical Nutrition* evaluó docenas de compuestos y llegó a la conclusión de que los arándanos reducían el riesgo de hipertensión, con un valor *p* de 0,03. Sin embargo, los autores habían considerado tantas sustancias y habían realizado tantas comparaciones (más de cincuenta) que era casi seguro que antes o después obtendrían algún valor de *p* inferior a 0,05.



En un estudio muy conocido, un equipo de neurocientíficos concluyó que, cuando a un salmón se le presentaban imágenes de personas que expresaban emociones, se activaban algunas regiones de su cerebro. Es más, el valor estadístico del resultado quedaba avalado por un valor de *p* inferior a 0,001. Pero, como apuntaron los propios investigadores, eran tantos los patrones que podían medirse que ya de antemano podía adivinarse que obtendrían algún resultado significativo. Sin embargo, a pesar de lo ínfimo del valor de *p*, era del todo imposible que el pez hubiese reaccionado a las emociones humanas. El salmón que habían sometido a las pruebas de resonancia magnética funcional estaba muerto.

—*Charles Seife*

AGENDA

CONFERENCIAS

3 de octubre
El origen de los elementos
Martin Asplund, Instituto Max Planck de Astrofísica
Fundación BBVA
Madrid
www.fbbva.es

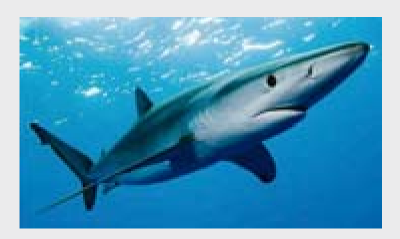
5 de octubre
Fotónica, herramienta científica de frontera: desde Einstein a la nanomedicina
Lluís Torner, Instituto de Ciencias Fotónicas
Ciclo «Desafíos del siglo XXI»
Residencia de Investigadores del CSIC
Barcelona
www.residencia-investigadors.es

EXPOSICIONES

Hasta el 16 de octubre
Bosques de la Rioja
Casa de las Ciencias
Logroño
www.logro-o.org/casadelasciencias

Hasta el 16 de octubre
AIRE. Respiración y salud infantil
Cosmocaixa
Barcelona
www.obrasocial.lacaixa.es

A favor de los tiburones, un mar de esperanza
Centro de Recuperación de Animales Marinos
El Prat de Llobregat, Barcelona
www.cram.org



CRAM AUDIOVISUAL (*tiburón*)

OTROS

Del 3 al 5 de octubre - Seminario
Sistemas cuánticos abiertos
Instituto de Química-Física Rocasolano
Madrid
fama.iff.csic.es/con/MWOQS-2011

Del 3 al 7 de octubre - Festival
II Festival internacional de cine científico y ambiental de Doñana
Centro Internacional de Estudios y Convenciones Ecológicas y Medioambientales
Almonte
www.asecic.org

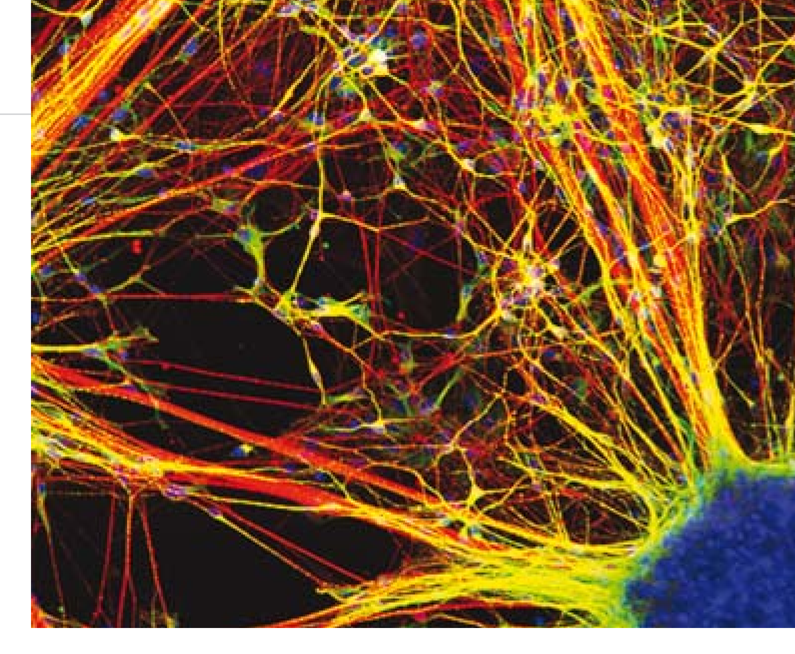
NEUROCIENCIA

Enfermedad mental a la carta

Una nueva técnica abre una nueva perspectiva para el estudio de trastornos psiquiátricos complejos.

Ningún órgano del cuerpo humano se resiste más a su estudio que el cerebro. Se pueden examinar células vivas de hígado, pulmones y corazón, pero hacer una biopsia de cerebro resulta, por diversas razones, más problemático. Dado que es imposible observar células humanas vivas en acción, los científicos han visto entorpecidos sus esfuerzos por comprender los trastornos psiquiátricos. Se ha hallado, no obstante, un nuevo enfoque prometedor, que podría revolucionar el estudio y el tratamiento de enfermedades como la esquizofrenia, el autismo y el trastorno bipolar. Un equipo del Instituto Salk de Estudios Biológicos de la Jolla, California, sustrajo células epiteliales de un paciente con esquizofrenia, las convirtió en células madre adultas y después hizo que dichas células madre crecieran hasta formar neuronas. El conjunto de células cerebrales resultante permitió a los neurocientíficos observar por primera vez, a tiempo real, la esquizofrenia humana a nivel celular. Otro equipo, de la Universidad Stanford, convirtió células epiteliales humanas directamente en neuronas, sin pasar por la fase de células madre, aumentando la eficiencia del proceso. Ambos grupos publicaron en fecha reciente sus resultados en la revista *Nature*.

Los científicos ya habían observado los mecanismos patológicos de la anemia de células falciformes y las arritmias cardíacas fuera del organismo, pero el equipo del Instituto Salk, dirigido por Fred H. Gage, es el primero que aplica este enfoque a un trastorno neuropsiquiátrico genéticamente complejo. Descubrieron que las neuronas obtenidas de pacientes con esquizofrenia formaban menos conexiones unas con otras que las obtenidas de pacientes sanos. En relación a este déficit, también observaron que casi 600 genes se expresaban de forma alterada cuatro veces más de los que se creía. Según Gage, este enfoque podría mejorar los tratamientos: los psiquiatras podrían someter a cribado gran variedad de medicamentos para hallar el más eficaz para cada paciente.



Neuronas de un paciente con esquizofrenia.

A pesar de la novedad de esta línea de investigación, las perspectivas son prometedoras. «Este estudio abre un área de trabajo completamente nueva», señala Daniel Weinberger, director del Programa de Genética, Cognición y Psicosis del Instituto Nacional de Salud Mental. Aún no está claro qué respuestas podrán hallarse con el enfoque de las células madre, pero, al convertir en accesible lo que antes era inaccesible, se abre la puerta a preguntas que, hasta ahora, no podían formularse.

—Tim Requarth

¿QUÉ ES ESTO?

La erupción en el complejo volcánico de *Cordón Caulle*, una cadena de volcanes chilena, escupió nubes de ceniza a la atmósfera hasta una altura de unos 14.000 metros, a principios de junio. La ceniza volcánica consta de trozos de roca, cristal y otros minerales. La columna de humo también transporta electricidad estática (la separación de cargas positivas y negativas), por lo que estas grandes nubes de ceniza procedentes de erupciones pueden generar sus propios rayos, comenta Erik Klemetti, de la Universidad Denison. La columna de humo de la erupción, la primera en más de dos décadas, fue tan grande que podía verse desde el espacio y llegó hasta Tasmania.

—Ann Chin



«MODELLING SCHIZOPHRENIA USING HUMAN INDUCED PLURIPOTENT STEM CELLS», POR KRISTEN J. BRENNAND ET AL., EN *NATURE*, VOL. 473, 12 DE MAYO DE 2011 (*neuronas*); CARLOS GUTIERREZ *REUTERS* (*erupción*)

ECONOMÍA

Sobre el origen del papel moneda



Si lo desea, puede echarle la culpa de la situación económica actual al papel moneda: la aparición de los billetes de banco en China hace más de mil años aceleró la acumulación de riqueza, el déficit presupuestario y la expansión del crédito. En definitiva, todo lo que hace falta para llegar a una crisis financiera como la actual.

Cuando los mercaderes chinos empezaron a usar papel moneda durante la dinastía Tang (entre 618 y 907 d.C.), con dificultad hubieran podido prever tales problemas. En aquel momento, la posibilidad de canjear billetes por monedas tras un largo viaje supuso una ayuda enorme: el papel reducía la carga de los comerciantes, por lo que estos podían transportar grandes cantidades de dinero.

El uso se extendió a todo el país durante el siglo x, cuando la escasez de cobre obligó al emperador de la dinastía Song a emitir los primeros billetes de curso legal. Una serie de inventos previos (el papel, la tinta y la impresión en grabado) facilitó la expansión del papel moneda.

Cuando Marco Polo visitó el Imperio mongol en el siglo xiii, quedó impresionado por las fábricas de moneda de Kublai Khan, a las que relacionó con la aparente prosperidad económica de la región. (El explorador no se percató de la inflación que provocaba la rápida impresión de billetes.) Algo después, la rauda circulación del papel moneda permitió a algunas naciones europeas extraer recursos de Asia y África, y alterar con ello el equilibrio mundial de poder.

Hoy el papel moneda comporta también el regreso de la riqueza a los países en desarrollo. La convertibilidad financiera permite a China comprar bonos estadounidenses y financiar con ello deudas que quizá no se salden jamás. Sin embargo, también provoca una escalada en el ritmo de acumulación de la riqueza. El papel moneda y su heredero moderno, el dinero electrónico, fueron la causa de las burbujas recientes en el precio de las materias primas y en la vivienda, dos de los factores que contribuyeron al comienzo de la crisis.

En estos momentos, parece que las cosas han vuelto a su punto de partida. En medio de las preocupaciones por la estabilidad financiera, no son pocos quienes que se refugian en los metales preciosos. Una reacción drástica contra formas más abstractas de moneda significa una vuelta a nuestros orígenes económicos: siglos después de nuestra conversión al papel, el precio del oro se ha disparado.

—Mara Hvistendahl

INVESTIGACIÓN

Ciencia para todos

Los debates científicos suelen llevarse a cabo a puerta cerrada: en laboratorios, en revistas de distribución limitada o en los pasillos de congresos a los que asisten solo unos pocos investigadores especializados. Pero en mayo, todos fuimos testigos de tres debates académicos que se ventilaron en público, en gran parte a través de Twitter, blogs y wikis. Los episodios han animado a los partidarios del movimiento «ciencia abierta», pero algunos críticos temen que los debates puedan rebajarse a cacofonía. Sea como sea, estas historias ilustran un hecho claro: habitualmente la ciencia se construye más a partir de procesos caóticos y humanos que de momentos eureka.

Primero fue «#arseniclife», que empezó con un estudio polémico, publicado en la edición en línea de *Science*, que sugería que algunas bacterias construían su ADN con arseniato en lugar de fosfato. Los científicos enseguida trataron de encontrar fallos en los métodos de la investigación a través de blogs y de Twitter (de aquí el polémico apodo, tomado de la practica de categorizar los mensajes con etiquetas precedidas del símbolo #, o *hashtags*); el debate se recuperó en la versión en papel de *Science*, que tomó la sorprendente iniciativa de publicar ocho duras críticas de su propio artículo en mayo. Mientras tanto, en *Nature*, la habitual revisión por pares también había pasado a la esfera publica. Normalmente, los revisores mantienen su identidad en secreto, pero uno de ellos la reveló en Internet, afirmando que se sintió «desesperadamente disgustado» cuando la revista publicó un estudio sobre tasas de extinción que él había criticado.

También en mayo, *Nature Genetics* publicó en línea los resultados de un experimento para someterlo a debate científico abierto. Un equipo de investigadores que escribía un artículo sobre la mejor forma de hacer seguimientos de nuevas hipótesis biológicas surgidas de la genómica pidió opiniones en un foro de Internet. También dejaron abierto el proceso de redacción en Wiki-Genes, una página web colectiva. ¿Tuvo éxito el experimento? *Nature Genetics* pareció quedar satisfecha: publicó un editorial indicando que la discusión había sido tan exhaustiva que podía procederse a la publicación «sin necesidad de más revisión supervisada por pares». Sin embargo, el doctorando Giovanni Marco Dall'Olio, que había participado en la discusión, objetó que «no incluyeron casi nada de lo que se aportó en la wiki». Escribió, por supuesto, esa crítica en su blog.



—Mary Carmichael

GETTY IMAGES (*billetes*)

ENFERMEDADES INFECCIOSAS

Anatomía de un brote

Chikungunya es el nombre de un virus que pone los pelos de punta con síntomas que dan miedo: el dolor articular es tan desesperante que a menudo los pacientes no pueden permanecer erguidos y ni siquiera sentados durante meses. Este virus, que se transmite a través de un mosquito, se originó hace miles de años, en la zona sudoriental de África, donde solía causar una tasa baja pero continua de enfermos. Hace unos 50 años, una cepa benigna se extendió por Asia. Posteriormente, tras una sequía en Kenia en 2004, se disparó el número de casos de *chikungunya* en África y este nuevo brote avanzó hacia el este, atravesando el océano Índico y afectando con gravedad a cientos de miles de personas en Asia.



Mosquito tigre asiático

Esa nueva cepa de *chikungunya* parece estar sustituyendo a las cepas más antiguas y menos graves que antes circulaban por Asia. ¿Pero cómo lo ha hecho? En un estudio publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, un grupo de investigadores ha averiguado que conforme el virus viajaba, sufrió una mutación que le permitió transmitirse con mayor eficiencia, por medio de mosquitos asiáticos.

Scott Weaver, de la Universidad de Texas en Galveston, comparó las cepas africanas y asiáticas anteriores al brote con la cepa del último brote. Junto con sus colaboradores, encontró dos mutaciones que permitieron que el virus se uniera al mosquito tigre asiático (*Aedes albopictus*), insecto omnipresente que transmite el virus cien veces mejor que su huésped anterior, *A. aegypti*, mucho más raro. Algunas de las cepas africanas más antiguas contenían una de estas variantes; las cepas asiáticas más antiguas, en cambio, no las contenían. Eso hacía que a la cepa que llegó a Asia hace cincuenta años le resultase difícil adaptarse al mosquito tigre asiático. Cuando se produjo el último brote en África, el virus ya solo necesitaba una mutación para adaptarse al mosquito tigre africano y hacerse más virulento. «Es un estudio muy elegante y convincente», afirma Peter Palese, virólogo de la Escuela de Medicina Monte Sinaí, que no participó en la investigación.

Según Weaver, comprender la manera en que las mutaciones genéticas aumentan o reducen la capacidad de un virus de transmitirse por medio de mosquitos podría ayudar a que las autoridades sanitarias tomen medidas para evitar brotes.

—Carrie Arnold

QUÍMICA

Cuando el azul era un color «precioso»

¿Busca el azul perfecto? Especifique, por favor: ¿cobalto, prusia, azurita o ultramarino? Según el libro de Philip Ball *La invención del color*, si fuera usted un artista del siglo xiv, el mejor color azul le costaría como el rescate de un rey. Ni siquiera es posible reproducirlo en estas páginas —no es obtenible mediante la cuatricromía de la impresión ordinaria.

El azul más antiguo de factura humana —el pigmento sintético más antiguo— es el azul «egipcio», o azul malaquita. Los fabricantes de colores cocían en un horno una parte de cal, una parte de óxido de cobre y cuatro partes de cuarzo, lo que producía un material azul opaco que se molía finamente para conseguir el polvo con que se hacía la pintura. Ese material está presente en utensilios egipcios datados en torno a 2500 a.C. y aún se empleaba cuando la erupción del Vesubio en 70 d.C.

En la Edad Media, junto con la transmutación, los colores ocupaban una posición destacada entre las obsesiones de los alquimistas. Y la gran contribución de estos a las artes fue el azul ultramarino. Se obtiene este del lapislázuli azul, una piedra semipreciosa que por entonces procedía de yacimientos afganos. Aquella muy cara materia prima y su trabajosa preparación (innumerables amasados del mineral y lavados en lejía) producían el azul oscuro, intenso y vivo, que vemos, como señala Ball, en los mantos de la Virgen María. El cliente de un pintor medieval que pudiera permitirse una Virgen en azul ultramarino exhibía la piedad de un arzobispo y la riqueza de un moderno gestor de fondos de inversión.

Aún en 1800, pese a las posibilidades que ofrecían otros azules, los pintores seguían tras un sustituto más barato para al azul ultramarino. En 1824, la Sociedad Francesa para el Fomento de la Industria Nacional ofreció un premio de 6000 francos por un proceso industrial capaz de producir ultramarino sintético por menos de 300 francos el kilogramo. El fabricante de colores Jean-Baptiste Guimet reclamó el premio. Hacia los años setenta del siglo xix el esnob atractivo del pigmento natural se había extinguido, muerto a manos del tiempo y de un precio entre 100 y 2500 veces mayor que la variedad sintética. Ese azul ultramarino sintético fue el color preferido de impresionistas como Renoir, Cêzanne y van Gogh.

—Peter Brown

ALEX WILD CORBIS *(mosquito)*; SUSANNA PRICE *GETTY IMAGES* *(pigmento azul)*; GETTY IMAGES *(telar)*

Del telar mecánico a la pianola y los primeros ordenadores

En la francesa ciudad de Lyon del siglo XVIII el maestro tejedor Jean-Charles Jacquard no conseguía fabricar en una semana más de diez centímetros de brocado de seda. Incluso ese ritmo de producción solo era posible con la ayuda de un aprendiz que se sentaba sobre un banco de estirar de madera y tiraba a mano de cada hilo de urdimbre, mientras el maestro deslizaba a través del tejido hilos de trama de vivos colores. El implacable tedio de tejer un dibujo línea a línea podría explicar por qué su hijo, Joseph-Marie, quiso escapar de él incluso antes de que la Revolución Francesa dejara el brocado de seda pasado de moda, aunque por poco tiempo. Joseph-Marie no recapacitó hasta haber dilapidado la herencia familiar y, aun entonces, en vez de hacerse maestro tejedor, inventó una máquina para ahorrarse mano de obra.

La idea esencial de Jacquard consistía en guardar el dibujo del brocado en tarjetas perforadas que se harían pasar por el telar, con una tarjeta por línea de urdimbre. La máquina leería la disposición de los orificios perforados en cada tarjeta mediante un retículo de espigas activadas por resortes conectadas a ganchos, cada uno de los cuales tiraría de un hilo de urdimbre si la espiga correspondiente entraba en un orificio. Podía así programarse el telar y modificarse o cambiarse los dibujos reorganizando o sustituyendo el mazo de tarjetas.

Patentado en 1804, un telar Jacquard en manos expertas producía sesenta centímetros de brocado a la semana, toda una hazaña para una Francia que tanto dependía de las exportaciones textiles y que mereció la distinción de una visita de Napoleón. Pero ni siquiera el ambicioso emperador supo apreciar la importancia que la invención de Jacquard tendría para las generaciones futuras.

Como resultaría, los orificios perforados en un papel brindaron una solución a la medida para el desarrollo de toda clase de máquinas programables. Dentro del mecanismo neumático de una pianola, un rollo perforado ejecutaría una tocata de Bach, mientras que otro tocaría un rag de Gershwin. Infinitamente mayor fue la versatilidad dentro de los ordenadores, tal como el científico británico del siglo XIX Charles Babbage imaginó para su no construida «máquina analítica» y lo comprendió el ingeniero americano Howard Aiken en la década de los treinta del pasado siglo, cuando construyó el Harvard Mark I en IBM. En la estela de Babbage, Aiken empleaba pilas de tarjetas Jacquard en paralelo, con una de las pilas que ajustaba la operación aplicada para leer la información de la otra.

En los ordenadores modernos han desaparecido las tarjetas, al igual que los conmutadores electromecánicos de Aiken, pero los ordenadores incorporan todavía la misma arquitectura. Y aunque a los telares industriales ya no los manejan maestros del oficio, como el padre de Jacquard, la innovación de Joseph-Marie ha elevado la tejeduría a niveles aún más altos gracias a las consolas informáticas que controlan los patrones de dibujos de los textiles modernos.

—Jonathan Keats

Un telar Jacquard, inventado para ahorrar mano de obra y patentado en 1804, en una fábrica textil de Mongolia a mediados de los años sesenta del siglo pasado. En la sucesión de tarjetas perforadas (*izquierda*) se guardan las instrucciones de los dibujos a tejer.

BIOQUÍMICA

Viaje molecular al pasado

Nuevas técnicas permiten resucitar genes y proteínas de organismos extintos

Han transcurrido más de 150 años desde que Charles Darwin publicara *El origen de las especies*. Esta obra sentó las bases de la biología evolutiva e introdujo el concepto de selección natural como motor principal de la evolución y diversificación de las especies. Desde entonces, son innumerables los trabajos realizados en el campo de la biología evolutiva, aunque hubo que esperar hasta la década de los sesenta del siglo xx para que surgiera el estudio evolutivo de las moléculas de la vida, ácidos nucleicos y proteínas.

En general, paleontólogos y biólogos evolutivos recurren al análisis de restos fósiles para estudiar el origen y la evolución de las especies. Sin embargo, la degradación de ácidos nucleicos y proteínas hace difícil la conservación de los mismos y, salvo muy contadas excepciones, resulta imposible encontrar restos moleculares en fósiles. Aun en el mejor de los casos, el examen de fósiles presenta dificultades y limitaciones. Los fósiles anteriores a la explosión Cámbrica, por ejemplo, son muy escasos. Ocurrida hace 542 millones de años (Ma), esta supuso el origen de los organismos multicelulares complejos. En el período precámbrico, la mayoría de los organismos eran procariotas o eucariotas simples; sus restos fósiles son difíciles de analizar, ya que sus morfologías pueden confundirse fácilmente con formaciones minerales. Por ello, en las últimas décadas se ha propuesto el desarrollo de otras técnicas que permitan el estudio de la evolución de las especies y de sus moléculas constituyentes.

Resurrección de enzimas

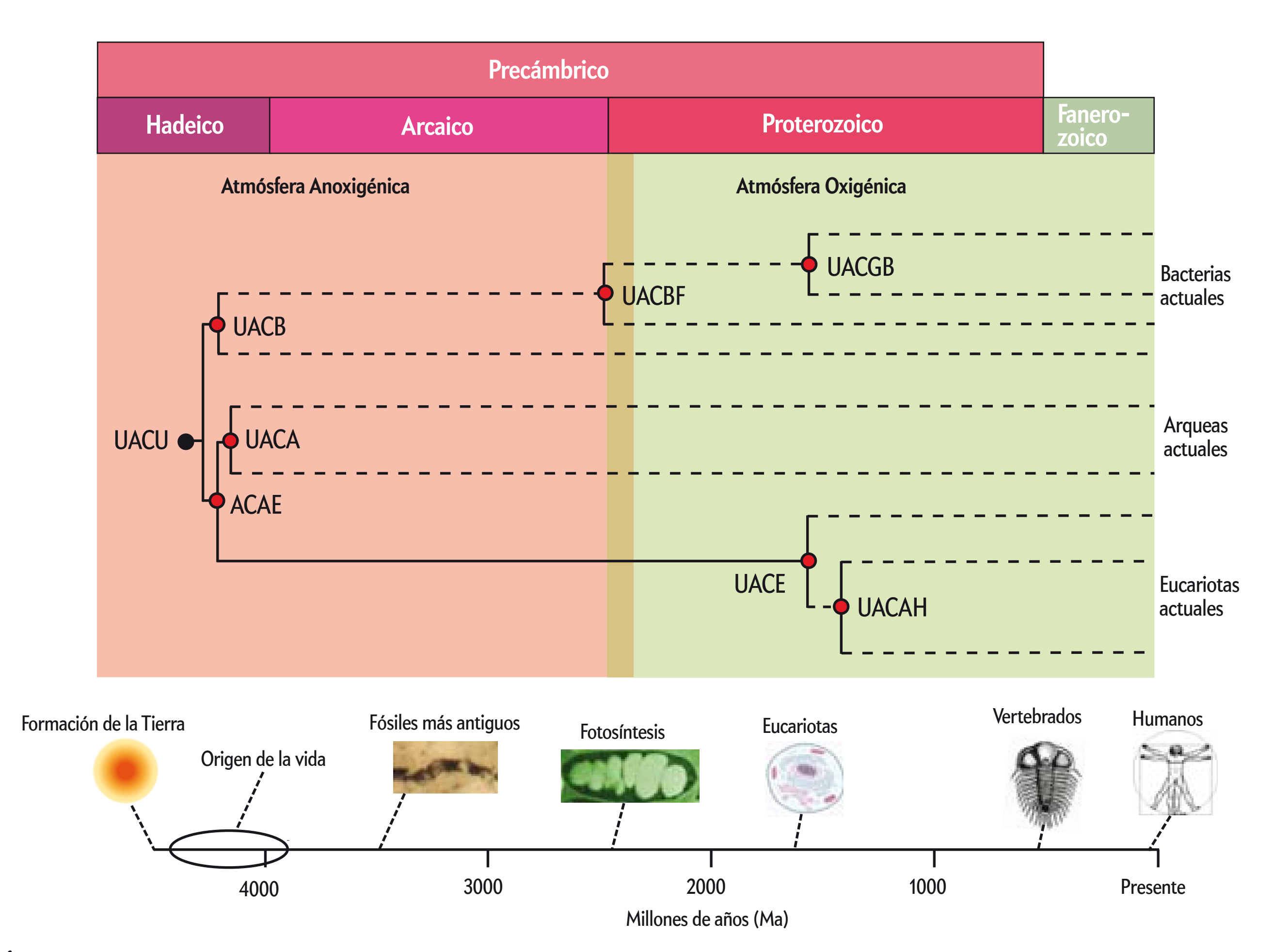
Una de las técnicas que está originando información sin precedentes es la reconstrucción, mediante técnicas estadísticas, de secuencias de genes y proteínas ancestrales. Gracias al extenso número de secuencias que se encuentran en las bases de datos y que se siguen generando a buen ritmo, es posible establecer relaciones filogenéticas entre especies a nivel de ácidos nucleicos y proteínas. Para muchos genes y proteínas es incluso posible construir extensos árboles filogenéticos que incluyan numerosas secuencias de los tres dominios de la vida: Bacteria, Eucariota y Arquea. A partir de estas filogenias, se aplican modelos estadísticos para determinar cuál es la secuencia más probable de un determinado ancestro entre dos secuencias conocidas. Iteraciones sucesivas permiten reconstruir las secuencias correspondientes a todos los antepasados de una filogenia. Luego, en el laboratorio, se obtienen los correspondientes genes, proteínas o ambos. De esta manera, es posible «resucitar» moléculas extintas hace miles de millones de años. La gran ventaja de estas técnicas es que revelan información molecular imposible de obtener a partir del análisis de restos fósiles. Información que puede utilizarse asimismo para el estudio de eventos geológicos, climatológicos o biológicos ocurridos en el pasado.

En nuestro grupo, y en colaboración con investigadores del Instituto de Tecnología de Georgia y de la Universidad de Granada, hemos aplicado esa técnica a la resurrección de la tiorredoxina, una importante enzima antioxidante presente en todos los seres vivos. Esta molécula se halla implicada en numerosas funciones celulares (reducción de puentes disulfuro en proteínas, replicación del ADN y plegamiento de proteínas) y posee unas características altamente conservadas en todas las especies. Los resultados de la investigación se publicaron en mayo en la revista *Nature Structural & Molecular Biology*.

A partir de más de 200 secuencias de organismos actuales, se construyó una extensa filogenia que permitió inferir la secuencia de tiorredoxinas ancestrales de entre 1500 y 4000 Ma. Entre las enzimas resucitadas se encontraban tiorredoxinas pertenecientes a los últimos antepasados comunes de las bacterias y arqueas modernas, así como el ancestro común de arqueas y eucariotas. Se estima que estos organismos habitaron el planeta hace más de 4000 Ma, poco después del origen de la Tierra hace unos 4600 Ma. Estas moléculas representan las proteínas más antiguas jamás obtenidas, probablemente pertenecientes a algunas de las formas de vida más primitivas del planeta.

Uno de los aspectos que mayor interés despierta de las tiorredoxinas es su mecanismo catalítico. Para su estudio se empleó la espectroscopía de fuerza atómica a fuerza constante (*force-clamp*), una técnica refinada que permite el estudio de moléculas individuales. La actividad de la tiorredoxina se determina a partir de la velocidad con que esta reduce los puentes disulfuro de una proteína sustrato genérica. Al aplicar fuerza sobre los puentes disulfuro del sustrato, puede manipularse directamente la actividad de la enzima, lo que permite obtener detalles sobre el mecanismo catalítico que serían inaccesibles mediante otras técnicas bioquímicas tradicionales. Las tiorreodoxinas de organismos actuales muestran hasta tres mecanismos catalíticos; utilizan uno u otro según la fuerza que se aplica al sustrato. Se trata, por tanto, de una química mucho más compleja

La actividad de la tiorredoxina se mide a partir de la velocidad con que esta reduce los puentes disulfuro (*amarillo*) de una proteína sustrato. Mediante espectroscopía de fuerza atómica a fuerza constante puede estudiarse el mecanismo catalítico de una sola molécula. Un primer pulso de fuerza (*F*) despliega rápidamente el dominio proteínico de interés. Luego, cuando el puente disulfuro se expone al disolvente, una molécula de tiorredoxina lo reduce.



Árbol filogenético de las tiorredoxinas resucitadas (*puntos rojos*). Se indica el tiempo geológico y el tipo de atmósfera. Estas enzimas pertenecieron a diversos organismos: el último ancestro común universal (UACU), último ancestro común de bacterias (UACB), de arqueas (UACA), de arqueas-eucariotas (ACAE), de bacterias fotosintéticas (UACBF), de γ-proteobacterias (UACGB), de eucariotas (UACE) y último antepasado común entre animales y hongos (UACAH). Las líneas discontinuas corresponden a bifurcaciones. En la línea temporal se indican también algunos de los acontecimientos biológicos más relevantes.

que la de reactivos no enzimáticos más sencillos. Para nuestra sorpresa, descubrimos que los mismos mecanismos químicos que se observan en las enzimas modernas estaban ya presentes en las enzimas ancestrales de más de 4000 Ma.

Además de la actividad, se examinaron otras propiedades. Se comprobó que las enzimas antiguas eran más estables: presentaban una temperatura de desnaturalización hasta 25 ºC superior a la de las modernas. Ello sugiere que los organismos que las contenían eran termófilos (vivían a más de 60 ºC de temperatura). También cabe resaltar que la estabilidad térmica de las tiorredoxinas ancestrales ha disminuido a lo largo de la evolución a un ritmo de 6 ºC por cada 1000 Ma. Curiosamente, técnicas completamente distintas basadas en el análisis de isótopos de oxigeno predicen un descenso similar de la temperatura de los océanos. Asimismo, mediante las técnicas de molécula individual, se demostró que las enzimas más antiguas eran activas a *p*H 5, condiciones en las que sus versiones modernas no lo son. Por tanto, los organismos primitivos que las contenían debieron de ser, además de termófilos, acidófilos.

Evolución de la vida

Las observaciones anteriores son compatibles con la teoría más aceptada sobre el origen de la vida. Según esta, el desarrollo de formas primitivas de vida tuvo lugar en agua en condiciones similares a las que se pueden encontrar en fuentes hidrotermales actuales. Ello sugiere que los organismos primitivos debieron de ser termófilos. Además, el contenido de gases atmosféricos hace 4000 Ma era diferente al que existe en la actualidad. La atmósfera no contenía oxígeno, ya que este se originó con el desarrollo de las bacterias fotosintéticas hace 2500 Ma. En su lugar, presentaba un elevado porcentaje de CO_2 que probablemente mantuvo a los océanos primitivos con un *p*H por debajo de 6, condiciones a las que los organismos primitivos debieron estar adaptados.

Resulta sorprendente comprobar que esas teorías sobre el desarrollo de formas primitivas de vida, que en numerosos casos cuentan con pocas y controvertidas pruebas científicas, concuerdan con los resultados obtenidos mediante la resurrección de tiorredoxinas. La recuperación de secuencias ancestrales ofrece sin duda una poderosa herramienta para comprender el origen de la vida y la evolución de las especies.

—Raúl Pérez Jiménez, Jorge Alegre Cebollada y Julio Fernández
Depto. de biología
Universidad de Columbia
Nueva York

FÍSICA CUÁNTICA

Cómo atrapar una onda

La función de onda describe por completo el estado cuántico de un sistema. Ahora se nos brinda un método para acceder a ella de manera directa

La mecánica cuántica constituye el marco que describe la física del mundo microscópico. Un elemento esencial en esta formulación viene dado por la función de onda, la cual contiene toda la información relevante sobre el sistema. Hasta ahora, la determinación experimental de las funciones de onda solo se había conseguido realizar mediante inferencias basadas en mediciones indirectas, pero eso acaba de cambiar en fecha reciente: Jeff S. Lundeen, del Instituto Nacional de Estándares de Medida canadiense, y sus colaboradores presentaron a principios de junio un método para medir de manera directa la función de onda.

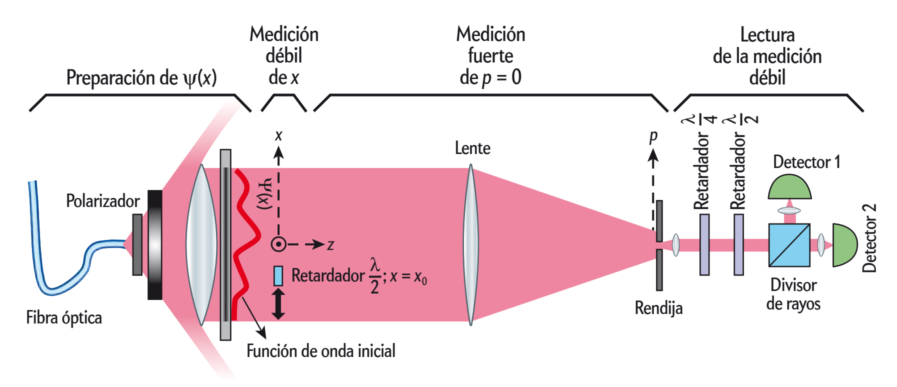
La función de onda de un sistema cuántico es una función compleja que, per se, no se considera un elemento físico de la teoría. Sin embargo, su módulo elevado al cuadrado representa la distribución de probabilidad asociada a los resultados posibles de un experimento; por ejemplo, la probabilidad de encontrar una partícula en cierto lugar. En este contexto, surge una pregunta natural: a pesar de su naturaleza abstracta, ¿podría determinarse experimentalmente una función de onda? Si solo se dispone de una copia del sistema, resulta imposible, debido a la perturbación aleatoria que todo proceso de medición induce sobre el sistema físico.

Sin embargo, la función de onda puede determinarse si se emplea un conjunto de sistemas preparados de manera idéntica: si se llevan a cabo una serie de medidas de cada una de las propiedades físicas de dicho conjunto de sistemas y, después, se emplean las distribuciones de probabilidad asociadas a tales propiedades, resulta posible determinar de manera algorítmica la función de onda. Esta forma indirecta de caracterizarla se conoce como tomografía del estado cuántico, técnica que se ha mostrado valiosísima en el ámbito de la información cuántica. Pero el método de Lundeen y sus colaboradores va más allá, puesto que permite acceder directamente a las partes real e imaginaria de la función de onda del conjunto. Así lo han demostrado sus medidas de la función de onda espacial transversal de fotones individuales.

La clave reside en el concepto de medida cuántica débil. En general, el sistema sobre el que deseamos efectuar una medición cuántica se acopla primero a otro sistema: el aparato de medida. Gracias a este se obtiene información sobre alguna propiedad (el observable) del primero. El acoplamiento entre el sistema y el medidor desplaza la aguja del aparato una cantidad que depende del estado del observable; además, la posición inicial de la aguja sufre cierta indeterminación cuántica. Una medición se dice *fuerte* si, una vez acabada la interacción entre el sistema y el aparato, los estados de la aguja correspondientes a los diferentes estados del observable se hallan separados entre sí una cantidad mayor que la incertidumbre inicial de la aguja. Por el contrario, una medición *débil* no es más que aquella en la que los estados relevantes de la aguja se solapan en una buena parte. Con ello se obtiene poca información sobre el sistema y, en consecuencia, este se perturba de manera insignificante en cada medición.

Las mediciones débiles se vuelven más interesantes cuando se combinan con la postselección; esto es, cuando quedan condicionadas al resultado de una medición fuerte posterior. Antes de la postselección, el centro del indicador muestra el valor promedio del observable medido. Tras la postselección, debido a un efecto de interferencia, el indicador se desplaza a un nuevo valor, denominado valor débil del observable. Nótese que para determinar un valor débil se necesitan numerosas repeticiones de la misma medición sobre sistemas preparados de manera idéntica, a fin de poder identificar el valor central del indicador. En los dos últimos decenios, los valores débiles se han usado con profusión para analizar algunas paradojas cuánticas, como la paradoja de Hardy (en la que una partícula y una antipartícula interaccionan, pero no se aniquilan si dicha interacción no es observada). En fecha más reciente, han posibilitado técnicas bastante útiles para medir señales de muy poca magnitud.

El método de Lundeen y sus colaboradores se basa en la observación de que una medición débil de la posición de una partícula, seguida de una medición fuerte de su momento, debería proporcionar la función de onda espacial de la partícula como valor débil siempre que el momento medido sea cero. La posición de un fotón a lo largo de un eje (llamémosle x) perpendicular a la dirección de propagación (eje z) no supone una excepción a este razonamiento. En su experimento, los investigadores generaron fotones uno a uno mediante un procedimiento de conversión paramétrica espontánea y, gracias a diversos instrumentos ópticos, dieron forma a la función de onda espacial transversal de los fotones ($\Psi(x)$, donde x denota la posición espacial). El medidor empleado para la medición débil fue la propia polariza-



Medición directa de la función de onda cuántica: Tras preparar el estado inicial de los fotones, se efectúa una medición débil de su posición sobre el eje x (*vertical*) gracias a un retardador de onda emplazado en $x = x_0$, el cual acopla al proceso de medida el estado de polarización de los fotones. A ello sigue una medición fuerte de los fotones con momento nulo (postselección). Por último, un análisis de la polarización de la luz en el estado final sirve para determinar las partes real e imaginaria de la función de onda en $x = x_0$.

ción de los fotones, la cual se utilizó como un indicador de tipo qubit (de dos niveles). Un retardador de onda (un dispositivo óptico consistente en una lámina muy delgada) colocado en la posición $x = x_0$ (pongamos que en $z = 0$) implementa el acoplamiento de la medición débil al rotar sutilmente la polarización de los fotones que se propagan por ese sitio.

La selección posterior de los fotones con momento nulo se consigue al enviarlos primero a través de una lente y luego, en el plano focal de esta, al detener todos excepto los que se encuentran en la posición $x = 0$, gracias a una minúscula rendija. Tras esta etapa, un análisis de la polarización de los fotones que quedan sirve para determinar $\Psi(x_0)$. La rotación promedio de la polarización es proporcional a la parte real de $\Psi(x_0)$, mientras que el cambio promedio en la elipticidad de la polarización es proporcional a la parte imaginaria de $\Psi(x_0)$. Este procedimiento se repite para diferentes posiciones x del retardador de onda, con lo que finalmente se reconstruye la función de onda completa $\Psi(x)$ en $z = 0$. Lundeen y sus colaboradores han demostrado la fiabilidad de su experimento.

El hallazgo —que yo explico coloquialmente como la posibilidad de emplear un medidor de la función de onda para sondear funciones de onda, casi del mismo modo en que un voltímetro (u osciloscopio) se emplea para medir voltajes— resulta sorprendente desde el punto de vista conceptual. Pero, más allá de las implicaciones filosóficas, cuenta con aplicaciones prácticas: puede utilizarse como herramienta en un amplio abanico de disciplinas, desde la óptica hasta la física atómica y la del estado sólido, en las que las nociones de información cuántica revisten gran importancia. Queda por explorar el potencial del método como alternativa a las técnicas de tomografía del estado cuántico, lo que requerirá comprobar si el acoplamiento entre sistema y medidor puede llevarse a cabo en circunstancias y sistemas físicos diversos. Sería interesante averiguar si este trabajo puede extenderse a sistemas entrelazados de varias partículas.

—Onur Hosten
Departamento de física
Universidad Stanford, California

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 474, págs. 170-171, 2011. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2011

BIOLOGÍA CELULAR

Formación de tejidos epiteliales

La configuración y función de los epitelios dependen en gran medida de estructuras y mecanismos celulares que confieren asimetría al tejido

La asimetría o polaridad es una característica propia de los tejidos epiteliales. La importancia de este rasgo se ha descubierto hace poco al observar que, cuando el mismo desaparece, se originan alteraciones y se forman distintos tipos de tumores.

Los tejidos epiteliales están formados por una o varias capas de células unidas entre sí que recubren todas las superficies libres del organismo. Revisten partes internas del cuerpo, como las cavidades, órganos y conductos tubulares, y también externas, como la piel. Los epitelios representan más del 60 por ciento de todas las células del cuerpo humano; en muchos casos forman el parénquima, o parte funcional, de numerosos órganos.

Los epitelios llaman la atención por su elevada asimetría o polaridad celular. Este rasgo se observa sobre todo en la membrana plasmática, lo que se conoce como polaridad apicobasal. La membrana apical, en contacto con el exterior del cuerpo, o con la luz del tubo o cavidad, y la membrana basolateral (basal y lateral), que conecta las células epiteliales entre sí y a estas con la lámina basal subyacente, presentan una composición distinta de lípidos y proteínas. Además, los orgánulos citoplásmicos, como el aparato de Golgi, el centrosoma o el cilio primario, también se distribuyen de modo asimétrico.

Durante el desarrollo, la interacción de las células epiteliales con la matriz extracelular genera una señal de polarización inicial. Después, esta polaridad está finamente controlada por unos pocos genes esenciales, que regulan la formación de las uniones celulares, el tráfico de proteínas y los reordenamientos del citoesqueleto para construir la arquitectura tridimensional del tejido.

Formación de uniones celulares

Las estructuras de unión celular, que en los mamíferos se conocen como uniones estrechas y uniones adherentes, se localizan en la membrana lateral y resultan fundamentales en la polaridad de las células epiteliales (así como en el establecimiento de otros tipos de unión, como los desmosomas). A nivel molecular, las uniones adherentes se basan en gran medida en el complejo de adhesión caderina-catenina. Esas uniones permiten una fuerte asociación entre las células epiteliales, lo que resulta esencial en una de sus funciones clave, la formación de barreras protectoras. Pero además participan en diversos procesos fisiológicos, como las vías de señalización que regulan la proliferación celular y el crecimiento epitelial. Las uniones estrechas se localizan en la frontera entre las membranas apical y basolateral, por encima de las uniones adherentes. Allí actúan como una barrera que impide el movimiento de proteínas y lípidos entre estos dos dominios de membrana, lo que favorece la polaridad, y además sellan el espacio entre células vecinas. Cabe resaltar que la formación de estas uniones celulares guarda una estrecha relación con los complejos moleculares de polaridad celular.

Complejos moleculares de polaridad

Se trata de conjuntos de moléculas, altamente conservados desde un punto de vista evolutivo, que presentan relaciones antagónicas entre sí. Modulan la actividad de múltiples proteínas efectoras, la dinámica del citoesqueleto y el tráfico vesicular. Ello permite organizar y localizar las uniones celulares, lo que facilita la formación de capas polarizadas de células epiteliales y la adquisición de estructuras tridimensionales.

Los complejos de polaridad celular fueron identificados en organismos modelo, como levaduras, el gusano *Caenorhabditis elegans* y la mosca *Drosophila melanoganster*. Entre ellos se incluyen moléculas de andamiaje o estructurales y

proteínas con actividad quinasa y GTPasas (interruptores moleculares que pueden unirse a proteínas efectoras y modificar su actividad).

Existen tres complejos esenciales que confieren polaridad al epitelio: Par, Crumbs y Scribble. El mecanismo molecular de la función de esos complejos en la organización de las uniones celulares y la formación de los epitelios ha sido caracterizado recientemente. En un principio, las uniones estrechas y las adherentes se hallan entremezcladas y forman uniones inmaduras (puncta). La movilización de los complejos Par y Crumbs a la región apical permite la separación entre los dos tipos de uniones y la formación de la membrana apical. Por otro lado, el complejo Scribble está asociado a las uniones estrechas y resulta necesario para la identidad de la membrana basolateral.

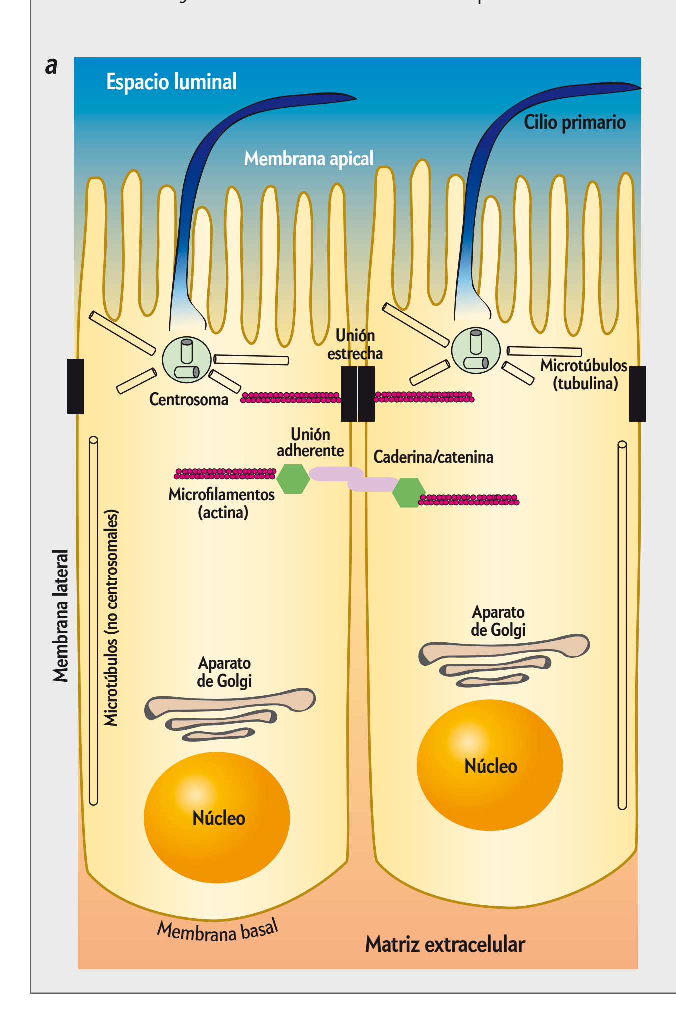
El citoesqueleto y el tráfico celular

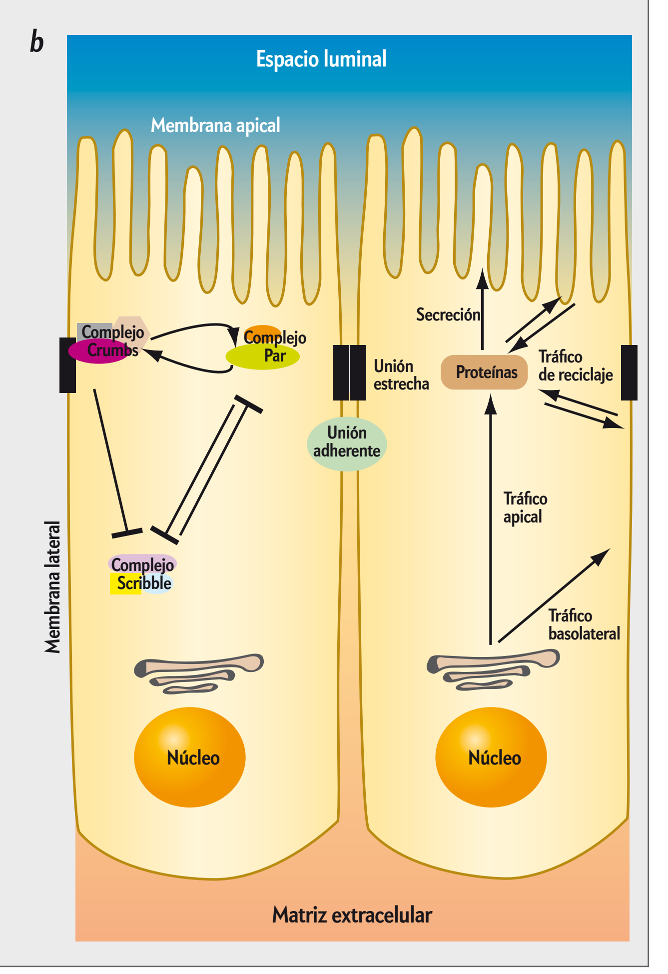
Además de su papel estructural, el citoesqueleto celular desempeña una función fundamental en la formación y el mantenimiento de tejidos epiteliales polarizados. Está constituido por microtúbulos, cuya proteína estructural es la tubulina; microfilamentos, cuya proteína estructural es la actina, y filamentos intermedios, formados por agrupaciones de proteínas fibrosas (queratinas).

ASIMETRÍA EPITELIAL

Los epitelios adquieren polaridad celular gracias a la diferenciación de la membrana plasmática de sus células: la membrana apical, en contacto con el espacio luminal, es distinta de la membrana basolateral, que conecta las células epiteliales entre sí y a estas con la matriz extracelular subyacente. Los orgánulos citoplásmicos, como el aparato de Golgi, el centrosoma (centro organizador de microtúbulos), y el cilio primario presentan asimismo una distribución irregular (*a*). Las uniones celulares, las uniones estrechas (*negro*) y las adherentes (*celeste*) están localizadas en la membrana lateral y son fundamentales en la polaridad de las células. La formación de esas uniones depende del ensamblaje de microfilamentos de actina, que a la vez mantiene la integridad y la tensión del tejido epitelial. Los microtúbulos constituyen la estructura interna del cilio primario. En las células epiteliales, algunos microtúbulos se nuclean en el centrosoma, en la base del cilio; otros se asocian a la membrana basolateral.

Además, los microtúbulos intervienen en diversos procesos celulares (*b*), como el movimiento de orgánulos, el transporte intracelular de sustancias y la división celular. Los complejos de polaridad Crumbs, Par y Scribble presentan relaciones antagónicas entre ellos, de forma que modulan la actividad de múltiples proteínas para dar identidad a las membranas. En particular, Crumbs y Par regulan la formación de la membrana apical y las uniones celulares, y Scribble, la formación de la membrana basolateral. El tráfico de vesículas permite la distribución específica de vesículas de membrana apical o basolateral, la secreción de proteínas al exterior celular y el reciclaje de proteínas de membrana.





CORTESÍA DEL AUTOR

El citoesqueleto se asocia a las uniones celulares y facilita la cohesión entre células; además, permite la adhesión de las células epiteliales con la matriz extracelular. De hecho, la formación de las uniones estrechas y adherentes depende del ensamblaje de microfilamentos, lo que contribuye a mantener la integridad y la tensión del tejido epitelial. Además, el citoesqueleto genera fuerzas de empuje y contráctiles que permiten la formación de invaginaciones y contracciones del tejido, procesos relevantes en la regeneración y remodelación tisular.

La polaridad de las células epiteliales depende de filamentos intermedios y microtúbulos. Los primeros se asocian a desmosomas y otros complejos de unión, y dan rigidez a la célula en tejidos sometidos a fuerzas mecánicas, como el epitelio de la piel. Los microtúbulos y microfilamentos intervienen en diversos procesos celulares, como el movimiento de orgánulos, el transporte intracelular de sustancias y la división celular.

Asimismo, el citoesqueleto organiza la formación del cilio primario, un orgánulo sensorial localizado en la membrana apical cuya estructura interna está constituida por microtúbulos. Algunos microtúbulos se nuclean (originan) en el centrosoma, o centro organizador de microtúbulos, ubicado en la base del cilio primario; otros no centrosomales se asocian a la membrana basolateral de la célula epitelial.

Un factor esencial del tejido epitelial es la composición diferencial de proteínas y lípidos en la membrana apical y basolateral. Por tanto, el tráfico de vesículas es otro proceso fundamental que incide en la polaridad celular. Permite el movimiento vesicular entre orgánulos, la distribución de proteínas nuevas (biosintéticas) desde el retículo endoplásmico a la membrana apical o basolateral, el reciclaje de proteínas viejas, el transporte de proteínas a las uniones celulares y el transporte del ARNm.

Polaridad celular y cáncer

El crecimiento y mantenimiento de la mayoría de los tejidos epiteliales de adultos se basa en la presencia de células madre pluripotentes que se autorrenuevan mediante divisiones celulares simétricas. Sin embargo, la función epitelial especializada y la homeostasis del tejido se genera cuando estas células experimentan divisiones asimétricas y se forma una progenie celular diferenciada.

Estudios recientes han determinado que los mecanismos de polaridad epitelial también regulan la división celular de las células madre epiteliales. Ello reviste especial importancia, ya que cada vez hay más pruebas de que las células madre podrían ser el lugar de iniciación de diferentes tipos de tumores epiteliales. Muchos de los genes que controlan la polaridad de las células epiteliales también regulan la orientación del eje mitótico y la simetría de las divisiones celulares en las células madre. Por tanto, las alteraciones en la maquinaria de polaridad epitelial podrían hacer que las células madre dejaran de responder a las señales inhibidoras del crecimiento y se dividieran de forma simétrica. Desaparecería entonces la diferenciación, y las células presentarían características proliferativas y tumorígenas.

El hallazgo de que la progresión tumoral se asocia a la pérdida de polaridad en las células tumorales abre nuevas vías en la investigación de dianas terapéuticas contra el cáncer.

—Fernando Martín Belmonte
Centro de Biología Molecular Severo Ochoa, CSIC, Madrid

ENERGÍA

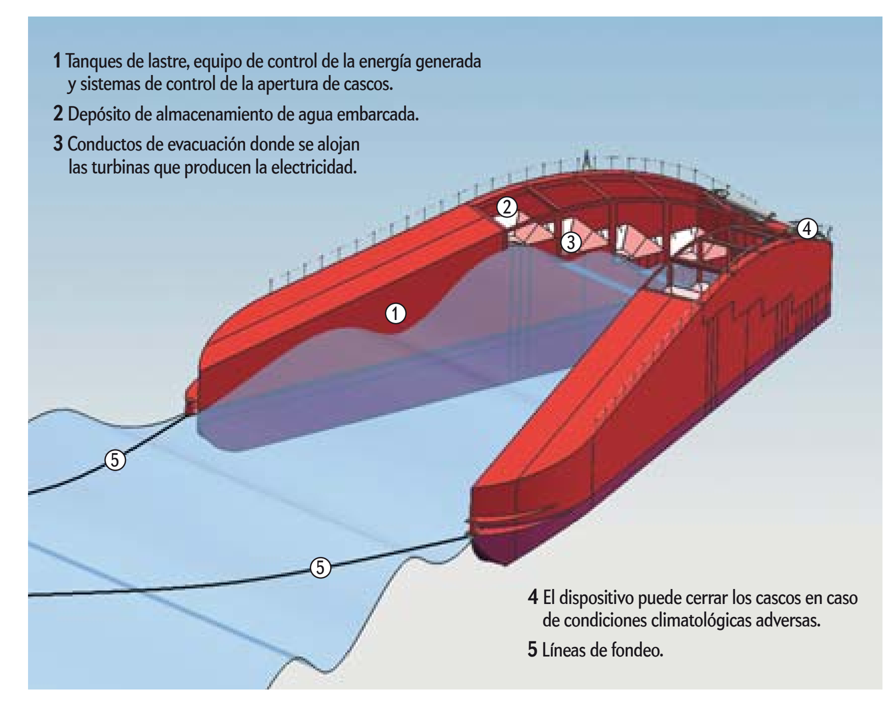
Aprovechar el oleaje

La conversión de energía undimotriz en eléctrica permitirá explotar una de las fuentes renovables con mayor potencial

Teniendo en cuenta las graves consecuencias ambientales que se derivan del uso de combustibles fósiles y los riesgos asociados a la energía nuclear, debe incrementarse con la mayor prontitud posible el porcentaje de energía generada a partir fuentes renovables. Esta es la recomendación básica del reciente informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), el organismo de las Naciones Unidas que se dedica al estudio y la lucha contra el cambio climático. En esta línea, la Unión Europea definió en marzo de 2007 el objetivo de obtener el 20 por ciento de la energía de fuentes renovables en el año 2020. El gobierno danés propuso en 2010 un objetivo del 30 por ciento para el año 2025, y se plantea a más largo plazo alcanzar el 100 por ciento.

Para aumentar el porcentaje de la energía obtenida de fuentes renovables es necesario, por una parte, incrementar la producción de las renovables ya operativas, como la eólica y la solar; por otra, desarrollar la explotación de otras fuentes renovables, como las marinas. Las principales energías marinas son la energía de las olas (undimotriz) y la energía de las corrientes.

Las corrientes marinas constituyen un recurso energético importante en ciertas zonas costeras en donde la velocidad del flujo supera los 1,5 metros por segundo (m/s), unos 3 nudos. Estas zonas suelen hallarse en cuerpos de agua semicerrados (rías, estuarios) sometidos a mareas importantes. Hasta hace pocos años, la explotación de este recurso energético requería velocidades aún mayores, para lo cual era necesario concentrar el flujo mareal mediante diques, cuyo impacto ambiental era notable. En la actualidad pueden aprovecharse las corrientes de 1,5 m/s o superiores sin necesidad de diques —por tanto, con menor impacto ambiental— mediante el uso de turbinas sumergidas (similares a las eólicas) o dispositivos oscilantes. Con todo, debido al limitado número de zonas con corrientes de esta velocidad y con la profundidad necesaria para la instalación de los equipos, la energía marina con mayor potencial no es esta, sino la que poseen las olas.



El convertidor de energía del oleaje WaveCat© consiste en un sistema flotante formado por dos cascos de acero convergentes. Está diseñado para operar lejos de la costa y a profundidades de entre 50 y 100 metros. Sistemas de conversión como este permitirán aprovechar la energía undimotriz que se genera en las zonas costeras.

PROYECTO WAVECAT©, XUNTA DE GALICIA

Mar adentro

La energía undimotriz puede considerarse una forma concentrada de energía solar, puesto que las olas son generadas por la acción del viento sobre la superficie del mar, y el viento, a su vez, es consecuencia de la energía solar captada por la atmósfera.

La energía de las olas presenta una serie de ventajas con respecto a otras renovables, entre las que cabe destacar tres. En primer lugar, su reducido impacto ambiental, especialmente si se utilizan técnicas de aguas profundas, en las que los equipos se sitúan lejos de la costa. En segundo lugar, el elevado nivel de precisión con el que se puede estimar el recurso energético disponible en una zona determinada. Y, por último, el hecho de que existen muchas zonas en las que el recurso es abundante y su explotación resulta viable. Como veremos a continuación, muchas de estas zonas se encuentran en España.

Dado que la energía undimotriz presenta variaciones geográficas notables, la explotación de la misma requiere, antes que nada, la evaluación del recurso, es decir, la determinación de la cantidad de energía que podría obtenerse en distintos enclaves de una región costera. La evaluación se realiza a partir de los datos registrados por las boyas de medición de oleaje repartidas a lo largo de la costa y mediante programas de modelización numérica.

Según los trabajos de nuestro grupo de investigación, publicados en *Renewable Energy* y *Energy*, el mayor potencial undimotriz español se encuentra en Galicia, sobre todo en dos áreas: la Costa de la Muerte (entre el cabo Finisterre y las islas Sisargas) y la zona en torno al cabo de Estaca de Bares. (La denominación de Costa de la Muerte alude a los numerosos naufragios que ocurrieron en la zona a consecuencia, precisamente, de sus enormes olas.) En ambas áreas la potencia media en aguas profundas es del orden de los 50 kilovatios por metro (kW/m), lo cual supone un recurso anual superior a 400 MWh/m. Estos valores sitúan dichos

tramos de la costa española entre los más energéticos de Europa. Les siguen, dentro de España, otras zonas de la costa gallega y las costas asturiana, cántabra y vasca, con valores alrededor de 25 kW/m de potencia media y 200 MWh/m de recurso total anual.

El gran reto de cara a la explotación comercial de la energía undimotriz es de tipo técnico: es necesario desarrollar sistemas fiables y eficientes que permitan convertir la energía de las olas en energía eléctrica (sistemas WEC, de *wave energy converter*). Aunque no existe en la actualidad ningún WEC en fase de explotación comercial, se están investigando varias técnicas al respecto. Entre ellas cabe mencionar el WaveCat©, un equipo diseñado y patentado a nivel internacional por la Universidad de Santiago de Compostela. Se trata de un sistema flotante formado por dos cascos, como un catamarán —de ahí su nombre—. A diferencia de un catamarán, sin embargo, los cascos no son paralelos, sino convergentes. WaveCat© está diseñado para operar lejos de la costa y a profundidades de entre 50 y 100 metros. Por tanto, con un impacto ambiental reducido.

—Gregorio Iglesias Rodríguez
Área de ingeniería hidráulica
Universidad de Santiago de Compostela

MEDICINA

Virus y síndrome de fatiga crónica

Ante la posible causa vírica de este trastorno neurológico, los expertos aconsejan rechazar las donaciones de sangre de los enfermos

Los científicos pueden seguir debatiendo el papel de los virus en el síndrome de fatiga crónica, pero lo cierto es que los bancos de sangre no quieren correr riesgos. El verano de 2010, la AABB (organización no gubernamental que representa a las entidades que recogen donaciones de sangre) pidió a las personas que sufren esta afección que se abstuvieran de donar sangre. En diciembre del año pasado, la Cruz Roja estadounidense fue más allá: prohibió que donasen sangre en sus centros las personas que revelasen, en una entrevista previa, que sufrían el síndrome, caracterizado por fatiga y dolores graves con una duración de seis meses o más.



La causa de estas precauciones especiales es el XMRV (virus xenotrópico relacionado con el virus de la leucemia murina), un retrovirus que parece estar asociado al síndrome de fatiga crónica. Un estudio publicado en 2009 en *Science* reveló que el XMRV se había encontrado en un 67 por ciento de los pacientes y solo en un 3,7 por ciento de los participantes sanos. Sin embargo, trabajos posteriores no hallaron el virus ni en las personas sanas ni en las que sufrían el síndrome, lo cual sugiere, en opinión de algunos expertos, que el XMRV podría ser un contaminante de laboratorio que sesgó el estudio inicial.

¿Qué preocupación debería causarnos la presencia del XMRV en las reservas de sangre? No mucha. No hay pruebas de que nadie haya contraído el síndrome de fatiga crónica a causa de una transfusión sanguínea, así que el riesgo es solo hipotético. Además, tomar medidas más estrictas, como utilizar un cuestionario para rechazar de entre los donantes potenciales a aquellos que sufran el síndrome, distraería nuestra atención de enfermedades como el VIH y la hepatitis B, que se transmiten, sin ninguna duda, a través de la sangre, afirma Harvey Klein, presidente del grupo de trabajo de la AABB que se ocupa de este tema.

Aun así, los expertos siguen considerando la cuestión de si deberían o no realizarse pruebas con la sangre donada para

detectar el XMRV. El primer paso de ese proceso consiste en acordar un método estándar para detectar el virus en la sangre. Un equipo del Instituto Nacional del Corazón, los Pulmones y la Sangre está comparando diferentes pruebas de ácido nucleico y distintas técnicas de preparación de las muestras de sangre en uso por varios laboratorios, incluidos los Centros de Control de Enfermedades y la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos, para encontrar las mejores.

Si la prueba seleccionada confirmase los resultados del estudio de 2009, es decir, si detectara de forma regular el XMRV en las muestras de sangre de los pacientes con síndrome de fatiga crónica y no en los participantes sanos de control, «habríamos identificado métodos específicos con una sensibilidad suficiente como para detectar el XMRV en las muestras de sangre», afirma Simone Glynn, del Instituto Nacional del Corazón, los Pulmones y la Sangre, que coordina el estudio.

El paso siguiente consistiría en usar esa prueba para comprobar la presencia de XMRV en grandes cantidades de muestras de sangre de donantes. Si dicha presencia fuera muy frecuente, el equipo pasaría a examinar las muestras congeladas de sangre y buscaría pruebas de transmisión por transfusión. «En cambio, si no encontramos pruebas de la presencia de XMRV en las muestras de sangre de pacientes con síndrome de fatiga crónica ya diagnosticado, concluiríamos que estos virus no se hallan presentes en la sangre», afirma Glynn.

Mientras tanto, la prudencia aconseja rechazar las donaciones de personas que sufren el síndrome, señala Ian Lipkin, de la Escuela de Salud Pública Maliman de la Universidad de Columbia, que lidera la investigación sobre la relación entre el síndrome de fatiga crónica y el XMRV. Según Lipkin, el número de personas con el síndrome que disfrutan de una salud suficiente como para realizar donaciones de sangre es tan pequeño que la Cruz Roja y AABB han decidido, por diversas razones, tanto científicas como de otros tipos, que no merece la pena correr el riesgo.

—Nina Bai

FÍSICA

Detección ultrasensible

Mediante microesferas de vidrio que atrapan la luz es posible detectar la presencia de un número reducido de moléculas

Las «salas de los secretos» (*whispering galleries*) ofrecen una acústica sorprendente. En este tipo de estancias, normalmente abovedadas, cualquier sonido, aunque sea tan débil como un murmullo, recorre distancias muy superiores a las que este recorrería sin la ayuda acústica que les presta la estructura de la habitación; las ondas sonoras no se dispersan, rebotan por las paredes y se propagan a larga distancia. En la «sala de los secretos» del interior de la cúpula de la catedral de Saint Paul de Londres, totalmente circular, el susurro de una persona puede ser escuchado con claridad por otra que se encuentre al lado opuesto de la cúpula, a más de 30 metros.

En un artículo de 1910, Lord Rayleigh comentaba que la óptica geométrica resultaba útil para entender el modo en que el sonido que se reflejaba en las paredes de la galería lo hacía al modo que la luz se refleja totalmente en la superficie que separa un material transparente de otro con índice de refracción menor [*véase* «Algunas "salas de los secretos" se distinguen por reflejar el sonido, pero hay otras más intrigantes», por Jearl Walker; Investigación y Ciencia, diciembre de 1978].

Ciertamente, ese fenómeno acústico ocurre también en las ondas luminosas que pueden propagarse por el ecuador de una pequeña cavidad esférica de vidrio totalmente transparente. La luz se refleja en la pared interior de la esfera y queda atrapada mientras da un gran número de vueltas. Número que, para esferas de un diámetro de alrededor de 100 micrómetros, puede ser superior a un millón. Esta luz se escapa lentamente por la misma superficie de la esfera, lo que permite que pueda interaccionar con cualquier sustancia que se deposite en la parte externa de esa superficie.

El segundo armónico

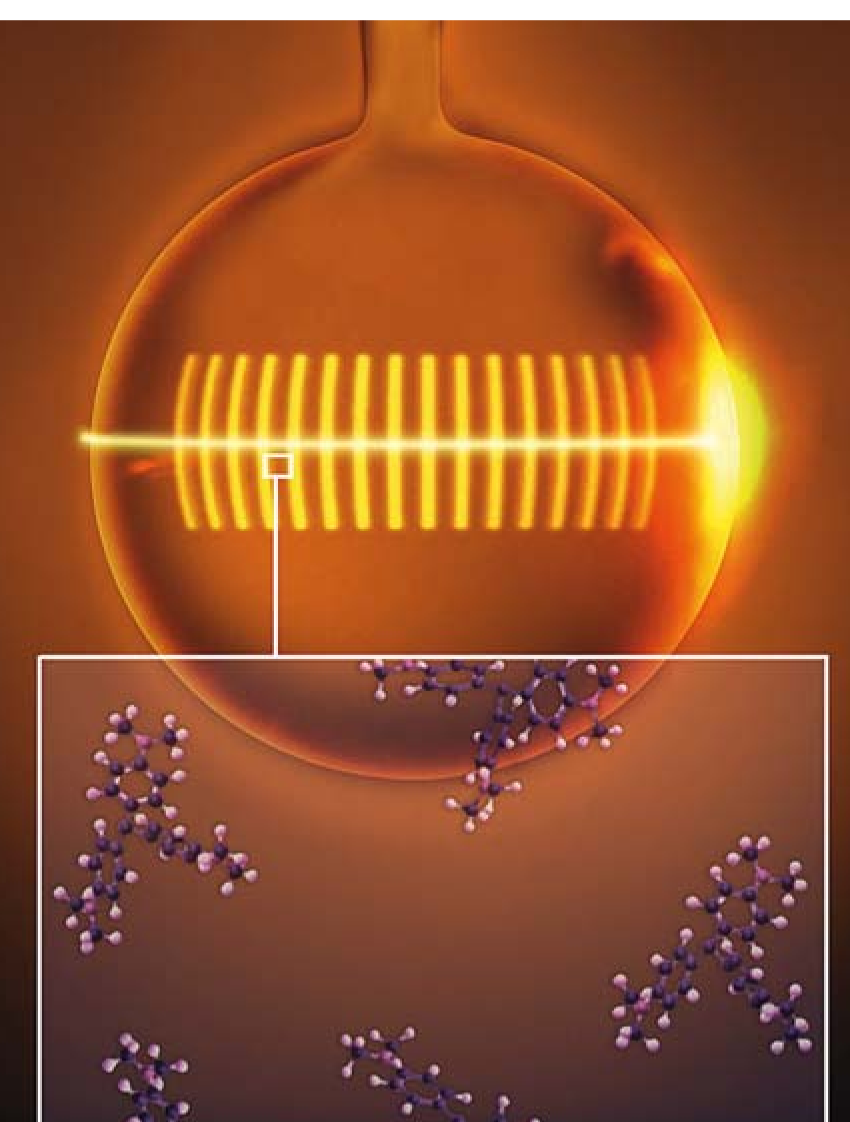
Cuando la luz interacciona con moléculas o átomos fluorescentes, estos emiten una luz de menor energía (frecuencia inferior). Un buen ejemplo de ello son las armillas de seguridad, que convierten la luz ultravioleta o azul en un intenso amarillo. También se utilizan moléculas fluorescentes a modo de marcadores de otras sustancias que se quieran detectar. Pero la mayor parte de los materiales que nos rodean no contienen moléculas fluorescentes; simplemente absorben o reflejan parte de la luz que les llega. No obstante, además de una respuesta linealmente proporcional a la intensidad de la luz, todo material presenta una respuesta no lineal: remite una parte muy pequeña de la luz que le llega a una frecuencia que dobla la frecuencia incidente (onda correspondiente al «segundo armónico»). Este mecanismo permite convertir una luz infrarroja en visible.

El proporcionar una explicación teórica a ese fenómeno de la óptica no lineal, entre otras aportaciones a la física, le valió a Nicolaas Bloembergen el premio Nobel de Física en el año 1981. Después de que se demostrara experimentalmente el duplicado de la frecuencia de la luz de un láser, las aplicaciones de la óptica no lineal han ido ganando relevancia en la tecnología láser desarrollada durante los últimos decenios. Hoy en día, buena parte de los láseres que emiten luz verde o azul se basan en dicha interacción no lineal, o generación de luz en el segundo armónico.

Sin embargo, esa luz generada mediante una interacción óptica no lineal solo puede ser percibida por el ojo humano cuando la interacción se produce con luz láser muy intensa y se dispone de un material de alta densidad como, por ejemplo, los cristales inorgánicos que incorporan gran parte de los láseres actuales. En la mayoría de los casos, la luz generada es extremadamente débil, totalmente invisible para el ojo humano e incluso para los detectores de luz más sensibles.

Amplificador óptico

Pero si lográramos detectar la luz débil que generan unas pocas moléculas a tra-





En la superficie de una pequeña esfera de vidrio (359 micrómetros de diámetro) se deposita una monocapa de moléculas de violeta de metilo. Luego, mediante el bombardeo de electrones, se elimina el recubrimiento en unas zonas determinadas (*franjas verticales claras*). Mediante una fibra, se acopla una luz láser infrarroja. La luz queda atrapada en el interior de la esfera, dando vueltas, de modo que el pulso de luz se sobrepone a sí mismo y se convierte al segundo armónico; se genera así una señal amplificada en más de un millón de veces respecto de la que se obtendría si no existiera el efecto «sala de los secretos» (*whispering gallery*). Las moléculas de violeta de metilo interaccionan con la luz que escapa por el ecuador durante el proceso; esta luz, correspondiente al segundo armónico generado, es de color violeta (longitud de onda 400 nanómetros) y muy débil, por lo que aquí no resulta visible. En esta imagen tomada por una cámara CCD con un objetivo de microscopio se observa el cúmulo de luz emergente solo a la derecha de la microesfera, debido a que solo puede verse la luz que sale de cara al objetivo (el patrón de franjas sin analito y el haz de luz amarilla del ecuador se han superpuesto a la microscopía por mor de claridad).

CORTESÍA DEL AUTOR

vés de una interacción no lineal, podríamos desarrollar métodos de análisis ultrasensibles que permitirían descubrir la presencia de sustancias potencialmente peligrosas para el ambiente, la seguridad o salud humanas, mucho antes de que grandes cantidades de las mismas causaran daños irreparables.

En marzo del presente año, en colaboración con Gregory Kozyreff, de la Universidad Libre de Bruselas, nuestro grupo de investigación publicó en *Nature Communications* un trabajo que ha significado un paso adelante en ese camino. Hemos demostrado que el uso de microcavidades esféricas de vidrio permite amplificar el «susurro» de luz producido por menos de 100 moléculas hasta niveles detectables. Mediante el ajuste de las dimensiones de la microcavidad —que vendría a ser una versión óptica y miniaturizada de una «sala de los secretos»—, se consigue que el pulso de láser incidente se vaya convirtiendo, conforme da vueltas dentro de la esfera, al segundo armónico; ello hace que la señal acabe amplificándose hasta en más de un millón de veces (respecto de la señal que se obtendría sin el efecto «sala de los secretos»). Para optimizar la interacción entre la luz amplificada que escapa de la esfera y las moléculas de analito (violeta de metilo en nuestro caso), estas se distribuyen según un patrón periódico que permite la concordancia entre las velocidades de fase de las ondas infrarroja y violeta.

Si la interacción no se hubiera producido en el modo «sala de los secretos», se hubieran necesitado al menos 1000 millones de moléculas para generar una señal de luz con la intensidad suficiente para que pudiera ser detectada. La posibilidad de reducir en varios órdenes de magnitud el número de moléculas necesarias para generar una señal de luz medible allana el camino hacia el desarrollo de detectores ultrasensibles basados en la generación de luz en el segundo armónico. Una gran ventaja de este tipo de detección es que no es necesario un marcaje previo de la molécula que se pretende detectar ya que, tal como se comenta más arriba, toda la materia presenta ese tipo de respuesta óptica no lineal.

—Jordi Martorell
ICFO-Instituto de Ciencias Fotónicas
Universidad Politécnica de Cataluña
Castelldefels

COSMOLOGÍA

¿Existe el multiverso?

Demostrar la existencia de universos paralelos completamente distintos del nuestro podría hallarse fuera del alcance de la ciencia

George F. R. Ellis

Durante la última década, una idea extraordinaria ha encandilado a un buen número de cosmólogos: la de que el universo en expansión que vemos a nuestro alrededor no es el único que existe, sino uno más entre una miríada de miles de millones de ellos. No habría, pues, un solo universo, sino un *multiverso*. En artículos publicados en esta revista o en libros como *La realidad oculta*, de Brian Greene, científicos de primera línea hablan de una revolución supracopernicana: no solo es nuestro planeta uno más entre muchos, sino que, a escalas cosmológicas, también nuestro universo resultaría insignificante. Sería uno más entre incontables universos, cada uno con sus propias leyes.

La palabra «multiverso» puede adquirir varios significados. El universo observable se extiende hasta una distancia de unos 42.000 millones de años luz, nuestro horizonte visual cósmico. Pero no existe ninguna razón para suponer que todo termine ahí. Más allá podría haber muchos —tal vez infinitos— dominios similares al nuestro. Cada uno habría comenzado con una distribución diferente de materia, pero todos se regirían por las mismas leyes de la física. La gran mayoría de los cosmólogos, yo incluido, aceptamos este tipo de multiverso, que Max Tegmark tipifica como de «nivel 1». Sin embargo, hay quienes van mucho más lejos y sugieren la existencia de otros universos completamente diferentes, con otra física, otra historia y, quizás, otro número de dimensiones espaciales. La mayoría serían estériles, pero algunos bullirían con vida. Uno de los principales defensores de este multiverso de «nivel 2» es Alexander Vilenkin, quien propone un conjunto infinito de universos, con un número infinito de galaxias y planetas, e infinitas personas que se llaman como usted y que se encuentran leyendo este mismo artículo.

Numerosas culturas han considerado desde la antigüedad ideas similares. La novedad radica en que la hipótesis se concibe ahora como una teoría científica, con todo el rigor matemático y la verificación experimental que ello implica. Personalmente, me muestro escéptico ante semejante afirmación. No creo que la existencia de esos otros universos haya sido demostrada ni que algo así pueda lograrse jamás. Los defensores de la idea del multiverso, además de ampliar nuestra concepción de la realidad, están redefiniendo de forma implícita lo que entendemos por ciencia.

LEVI BROWN



George F. R. Ellis, cosmólogo y profesor emérito de matemáticas en la Universidad de Ciudad del Cabo, es uno de los mayores expertos en relatividad general. Es coautor junto a Stephen Hawking de *The large scale structure of space-time* («La estructura a gran escala del espaciotiempo», Cambridge University Press, 1973), hoy considerada una obra clásica en gravitación y cosmología.

EN SÍNTESIS

La noción de universos paralelos saltó de las páginas de ficción a las revistas científicas durante la década de los noventa. Numerosos expertos afirman que miles de millones de otros universos, conocidos en su conjunto como multiverso, existen más allá de nuestro horizonte visual cósmico.

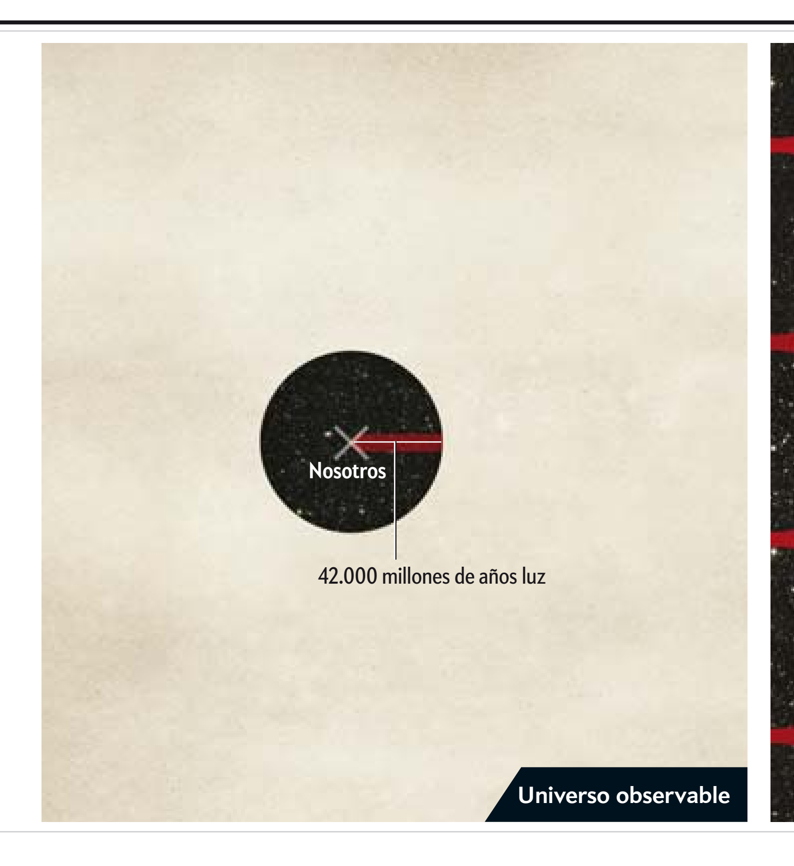
El problema de esta idea reside en que, por su propia naturaleza, se halla más allá de toda verificación empírica: en el mejor de los casos, los indicios de la existencia de un multiverso serían indirectos. La propuesta nos obliga a replantearnos lo que entendemos por ciencia.

¿Qué hay más allá?

Al escudriñar el universo, los astrónomos pueden observar hasta una distancia de unos 42.000 millones de años luz, nuestro horizonte cósmico. Esto se corresponde con la distancia que la luz ha podido recorrer desde la gran explosión, teniendo en cuenta lo que el universo se ha expandido desde entonces. Si suponemos que el espacio no termina ahí y que, en principio, podría extenderse hasta el infinito, pueden hacerse varias conjeturas acerca de sus propiedades.

Multiverso de nivel 1: Verosímil. La extrapolación más directa consiste en suponer que nuestro volumen constituye una muestra representativa del total. Otros seres en lugares lejanos verían regiones diferentes pero, aparte de variaciones aleatorias en la distribución de materia, todas mostrarían un aspecto similar. El conjunto de todas esas regiones, visibles o no por nosotros, conformaría la versión más sencilla de multiverso.

Multiverso de nivel 2: Dudoso. Numerosos expertos van más allá y especulan con la posibilidad de que, lo suficientemente lejos de nosotros, el mundo adopte una apariencia muy diferente. Nuestro entorno quizá no sea sino una de entre muchas burbujas que flotarían en un medio por lo demás vacío. Las leyes de la física podrían variar de una burbuja a otra, lo que daría lugar a una diversidad casi inconcebible. Las otras burbujas podrían ser imposibles de observar, incluso en principio. El autor y otros escépticos dudan de la existencia de este tipo de multiverso.



MÁS ALLÁ DEL HORIZONTE

Aquellos que se adhieren a la acepción más amplia de multiverso han propuesto diferentes mecanismos para explicar cómo habrían surgido todos esos mundos y dónde podrían encontrarse. Quizás ocupen regiones muy alejadas del espacio, tal y como predice el modelo de inflación caótica de Alan Guth, Andrei Linde y otros [*véase* «El universo inflacionario autorregenerante», por A. Linde; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1995]. También podrían existir en diferentes épocas, como ocurre en el modelo cíclico de Paul Steinhardt y Neil Turok [*véase* «El universo antes de la gran explosión», por G. Veneziano; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2004], o quizá se encuentren en el mismo espacio que el nuestro pero en una rama diferente de la función de onda cuántica, como defiende David Deutsch [*véase* «Física cuántica de los viajes a través del tiempo», por D. Deutsch y M. Lockwood; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1994]. Otra posibilidad reside en que carezcan de localización y se hallen desconectados de nuestro espaciotiempo, como proponen Max Tegmark y Dennis Sciama [*véase* «Universos paralelos», por M. Tegmark; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2003].

De entre todas las opciones, aquella que goza de mayor aceptación es la inflación caótica. Por ello, y aunque los argumentos que siguen pueden aplicarse al resto de las propuestas, en el presente artículo me centraré en ella. La inflación caótica sostiene que, a gran escala, el espacio es un vacío en eterna expansión en el que las fluctuaciones cuánticas generan sin cesar nuevos universos, como un niño que hace pompas de jabón. El concepto de inflación data de los años ochenta. Desde entonces, los físicos teóricos han trabajado mucho sobre él en el marco de la teoría de la naturaleza más exhaustiva de la que disponen: la teoría de cuerdas. Esta permite la existencia de burbujas muy diferentes entre sí. Cuando una de ellas nace, no solo su distribución inicial de materia es aleatoria, sino que también lo es el tipo de materia que posee. Nuestro universo contiene partículas como electrones y quarks, los cuales interaccionan a través de fuerzas como el electromagnetismo. Pero en otros universos existirían partículas e interacciones diferentes, es decir, otras leyes locales de la física. El conjunto de todas las leyes locales permitidas recibe el nombre de *paisaje*. Según algunas interpretaciones de la teoría de cuerdas, este paisaje es enorme, lo que asegura una diversidad fabulosa de universos.

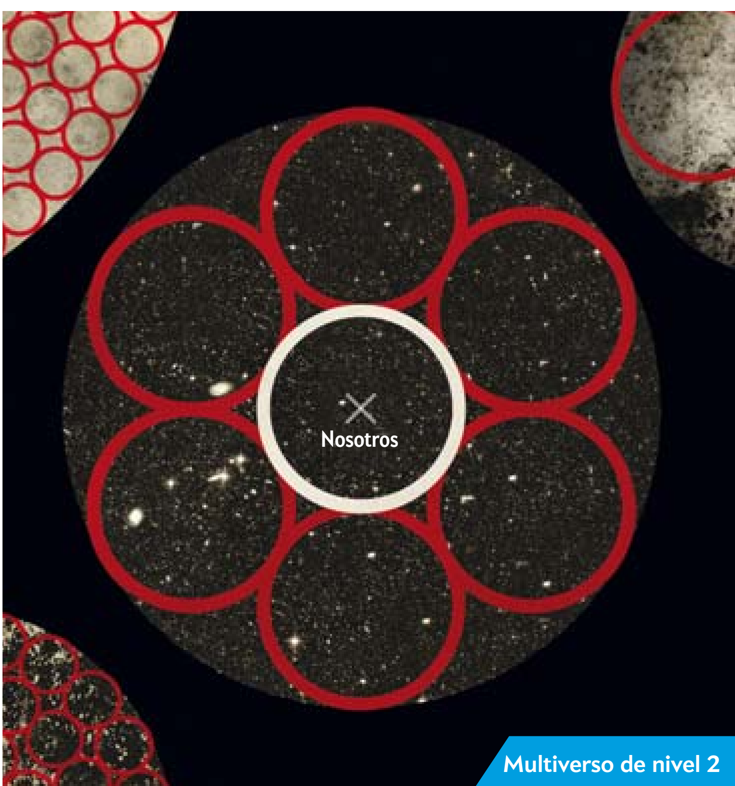
A muchos de quienes trabajan en la propuesta del multiverso —en especial, a los defensores del paisaje de la teoría de cuerdas—, los universos paralelos no les importan demasiado como tales. Para ellos, las objeciones al multiverso como concepto se muestran poco relevantes, ya que la validez de sus teorías se basa en la consistencia matemática interna y en la posibilidad de que, algún día, algunas de sus consecuencias puedan verificarse empíricamente. Suponen un multiverso como escenario adecuado para sus teorías, pero sin preocuparse por el origen de su existencia. Este último asunto concierne a los cosmólogos.

Para un cosmólogo, el problema fundamental del que adolecen las propuestas sobre el multiverso radica en la existencia de un horizonte visual cósmico. Este constituye el límite más allá del cual no podemos ver nada, pues, dado que la velocidad de la luz es finita, ninguna señal proveniente de más allá habría tenido tiempo de alcanzarnos desde la gran explosión. Todos los universos paralelos se encuentran más allá de nuestro horizonte visual y, por tanto, permanecerán siempre fuera de nuestro alcance, con independencia de los avances técnicos. De hecho, se hallan demasiado lejos como para haber ejercido jamás ninguna influencia sobre nuestro cosmos, razón por la que la existencia de un multiverso jamás podrá corroborarse de manera directa.

Sus partidarios sostienen que, en líneas generales, resulta posible describir lo que ocurre 1000, 10^{100}, $10^{1.000.000}$ o infinitas veces más allá de nuestro horizonte cósmico, y todo ello a par-

CHAD HAGEN





tir de los datos obtenidos en el interior del horizonte. Se trata de una extrapolación insólita. Pero tal vez el universo se cierre sobre sí mismo a escalas lo bastante grandes y no haya nada más ahí fuera. O quizá la materia se acabe en algún punto y no exista más que espacio vacío a partir de ahí. Simplemente, no sabemos lo que ocurre, puesto que no poseemos ninguna información sobre esas regiones ni la poseeremos jamás.

SIETE ARGUMENTOS CUESTIONABLES

La mayoría de los defensores de la idea del multiverso son profesionales serios que, aun conscientes del problema, consideran posible efectuar suposiciones razonables sobre lo que ocurre más allá del horizonte cósmico. Sus argumentos pueden agruparse en siete categorías, cada una de las cuales adolece de sus propias debilidades.

El espacio no tiene fin. Muy pocos ponen en duda que el espacio se extienda más allá de nuestro horizonte cósmico y que existan allí otros dominios. En este tipo de multiverso, podemos extrapolar lo que vemos aquí a los dominios vecinos, con mayor incertidumbre a medida que nos alejamos del horizonte. Resulta fácil imaginar variaciones más elaboradas, incluidas aquellas con una física distinta a la que conocemos. Pero el problema con las extrapolaciones que van de lo conocido a lo desconocido reside en que es imposible demostrar su falsedad. ¿Cómo decidir si un modelo que describe lo que ocurre en una región inobservable supone una extrapolación razonable? ¿Poseen otros universos diferentes distribuciones iniciales de materia, o cambian también los valores de las constantes fundamentales de la naturaleza? Cualquier opción es posible.

La física conocida predice la existencia de otros dominios. Las teorías de unificación actuales predicen la existencia de campos escalares, parientes hipotéticos de otros campos que llenan el espacio, como el campo magnético. Estos campos gobernarían el proceso de inflación cósmica y darían lugar a un número infinito de universos. Si bien tales modelos gozan de buenos fundamentos teóricos, la naturaleza de esos campos continúa siendo un misterio. Los experimentos aún han de demostrar su existencia, por no mencionar la medición de sus supuestas propiedades. Otro aspecto crucial radica en que, hasta ahora, carecemos de toda prueba de que la dinámica de esos campos genere distintas leyes de la física en otros universos.

La teoría que predice infinitos universos ha superado una prueba observacional clave. El fondo de radiación cósmica de microondas revela el aspecto del universo al final de su etapa inicial de expansión caliente. Y, en efecto, los patrones que exhibe dicha radiación sugieren que nuestro universo experimentó un período inflacionario. Pero no todos los tipos de inflación continúan por toda la eternidad y generan sin cesar un universo tras otro, y las observaciones no permiten distinguir qué clase de inflación tuvo lugar. Algunos cosmólogos, como Steinhardt, sostienen que una inflación eterna habría dado lugar a patrones en la radiación de fondo distintos de los observados [*véase* «La inflación a debate», por P. J. Steinhardt; Investigación y Ciencia, junio de 2011]. Andrei Linde y otros no se muestran de acuerdo. ¿Quién tiene razón? Todo depende de la física que supongamos para el campo inflacionario.

Las constantes fundamentales se hallan ajustadas para permitir la existencia de vida. Una característica notable de nuestro universo reside en que las constantes físicas poseen justo los valores que se necesitan para permitir la formación de estructuras complejas, entre ellas, los seres vivos [*véase* «Buscando vida en el multiverso», por A. Jenkins y G. Pérez; Investigación y Ciencia, marzo de 2010]. Steven Weinberg, Martin Rees, Leonard Susskind y otros autores sostienen que el multiverso proporciona una explicación elegante para esta aparente coincidencia: si las constantes de la naturaleza adoptan todos los va-

lores posibles en un conjunto lo bastante grande de universos, aquellos que hacen posible la vida deberán darse en algún lugar. Este razonamiento se ha aplicado a la densidad de energía oscura, la que hoy en día acelera la expansión del universo. Estoy de acuerdo en que el multiverso ofrece una explicación posible del valor de dicha cantidad. Incluso podría decirse que este hecho constituye la única opción con base científica de la que disponemos hasta ahora. Sin embargo, resulta imposible de verificar a partir de las observaciones. Además, la mayoría de los análisis al respecto consideran que las ecuaciones básicas de la física son las mismas en todas partes y que lo único que varía son los valores de las constantes. Pero, si tomamos en serio la idea de multiverso, esto no tiene ninguna razón para ser así.

La densidad de energía oscura concuerda con las predicciones del multiverso. Este argumento refina el anterior, ya que añade que el universo no se halla más ajustado para la vida que lo estrictamente necesario. Sus partidarios han calculado la probabilidad de que la densidad de energía oscura tome un valor u otro. Los valores más elevados resultan más probables, pero entonces el universo se muestra menos apto para la vida. El valor observado debería encontrarse en la frontera de la inhabitabilidad. Y, de hecho, así parece ocurrir. Pero donde este argumento falla es en que no puede emplearse un razonamiento probabilístico si no existe un multiverso al que aplicar el concepto de probabilidad. Se trata de un argumento que supone desde el principio la conclusión a la que se desea llegar y que no puede emplearse si existe solo un universo. Si bien sirve para comprobar la consistencia interna de la propuesta del multiverso, no demuestra su existencia.

La teoría de cuerdas predice una gran diversidad de universos. La teoría de cuerdas ha pasado de ser una teoría que explicaba todo a una en la que todo es posible. En su forma actual, predice que muchas de las cualidades esenciales del universo se deben a la mera casualidad. Si el universo fuese único, esas propiedades se antojarían inexplicables. ¿Cómo entender, por ejemplo, que las leyes de la física hagan gala de los atributos que hacen posible la vida? Sin embargo, si existiesen numerosos universos, tales propiedades tendrían perfecto sentido: no habrían aparecido por ninguna razón especial, sino que simplemente serían las que surgieron en nuestra región del espacio. Y si viviésemos en otro sitio, observaríamos otras (suponiendo, claro, que se tratase de un lugar donde se permite la existencia de vida, algo que sería imposible en la mayoría de los casos). Pero la teoría de cuerdas no es una que haya superado todo tipo de pruebas; ni tan siquiera se encuentra completa. En caso de contar con una demostración de que es correcta, sus predicciones constituirían un argumento legítimo y con base empírica a favor del multiverso. Sin embargo, carecemos de dicha verificación.

Todo lo que puede ocurrir acaba ocurriendo. Al tratar de explicar por qué la naturaleza obedece a ciertas leyes y no a otras, algunos físicos y filósofos han especulado con la idea de que la naturaleza nunca se ha visto obligada a tal elección: toda ley concebible resultaría aplicable en alguna parte. Semejante posibilidad se inspira, en parte, en la mecánica cuántica, según la cual todo lo que no está prohibido es obligatorio, como sentenció Murray Gell-Mann. Cada partícula sigue todos los caminos posibles y lo que observamos es una media ponderada de todas esas opciones. Así que tal vez ocurra lo mismo con todo el universo, lo que implicaría un multiverso. Sin embargo, resulta del todo imposible detectar esa multiplicidad de posibilidades. De hecho, ni siquiera podemos saber cuáles son: solo podemos interpretar la propuesta a la luz de algún principio organizador que decida qué está permitido y qué no, como el propuesto por Tegmark, que afirma que todas las estructuras matemáticas posibles han de hacerse realidad en algún dominio físico. Pero no tenemos idea de qué clases de existencia se derivan de este principio más allá de que, por fuerza, debe incluir el mundo que observamos a nuestro alrededor. Además, no hay forma de verificar la existencia o la naturaleza de un principio tal. Si bien se trata de una proposición atractiva en muchos aspectos, su aplicación a la realidad no pasa de la pura especulación.

FALTA DE PRUEBAS

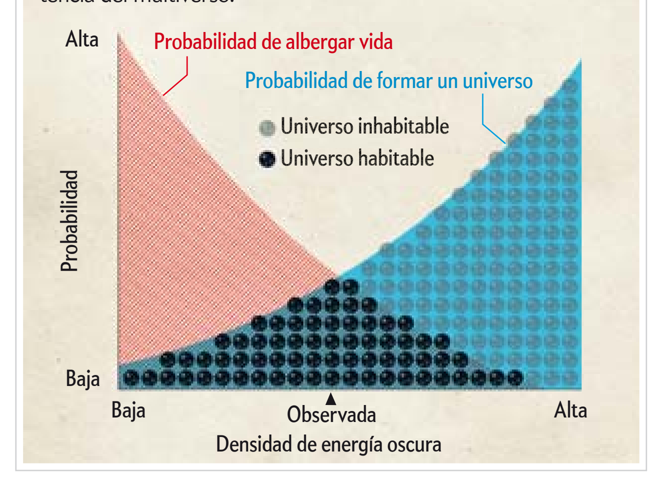
A pesar de todo lo anterior, algunos cosmólogos han sugerido varias comprobaciones empíricas de la existencia de universos paralelos. El fondo de radiación cósmica de microondas podría ocultar rastros de otros universos si, por ejemplo, el nuestro hubiera colisionado con otra burbuja del tipo de las que surgen en el modelo de inflación caótica. O quizá, si los universos se suceden en un ciclo interminable, quizá la radiación de fondo exhiba rastros de los que precedieron a nuestra gran explosión. Tales señales supondrían indicios reales de la existencia de otros universos. Algunos incluso aseguran haberlas detectado, pero por ahora el asunto es objeto de una gran controversia. Además, muchos tipos de multiverso no darían lugar a esos indicios, por lo que las pruebas observacionales solo permitirían verificar una clase específica de modelos.

Una segunda comprobación empírica provendría de las variaciones en una o más constantes fundamentales, lo que corro-

LA ENERGÍA OSCURA Y EL MULTIVERSO

¿Como un guante?

Como prueba, los defensores de la idea del multiverso citan a menudo la densidad de la energía oscura que domina nuestro universo. El proceso de inflación eterna dotaría a cada universo con una densidad aleatoria de energía oscura, pero pocos de ellos poseerían una densidad nula o muy baja: la mayoría exhibiría valores elevados (*azul*). Sin embargo, la energía oscura tiende a destruir las estructuras complejas que se necesitan para sustentar la vida (*rojo*). De esta forma, la mayoría de los universos habitables deberían presentar un valor intermedio de la densidad de energía oscura (*pico en la región negra*). Ese es precisamente el caso de nuestro universo. Los escépticos, en cambio, sostienen que lo anterior supone un argumento circular: la noción de probabilidad solo puede aplicarse si, desde el principio, se suponen muchos universos. Se trata, pues, de una prueba de autoconsistencia, no de existencia del multiverso.



JEN CHRISTIANSEN

boraría la premisa de que, después de todo, las leyes de la física no son tan inmutables. Algunos expertos sostienen haber observado dichas variaciones [véase «Variación de las constantes», por J. D. Barrow y J. K. Webb; Investigación y Ciencia, agosto de 2005], pero la mayoría duda de dichos resultados.

Una tercera posibilidad consistiría en medir la geometría del universo observable: ¿es esférica, hiperbólica o plana? En general, los modelos de multiverso predicen un universo no esférico, puesto que una esfera se cierra sobre sí misma y, por tanto, abarca un volumen finito. Por desgracia, lo anterior no supondría una prueba definitiva. El universo más allá de nuestro horizonte podría exhibir una geometría diferente de la de la parte observable. Además, no todas las teorías del multiverso descartan una geometría esférica.

Una prueba más concluyente vendría dada por la topología del cosmos: ¿se enrolla sobre sí mismo, como una rosquilla o un ocho? De ser así, poseería un tamaño finito, lo cual refutaría la mayoría de las versiones de la inflación y, en concreto, un multiverso basado en inflación caótica. Dicha topología daría lugar a patrones recurrentes en el cielo, como grandes círculos en el fondo cósmico de microondas [*véase* «¿Es finito el espacio?», por J.-P. Luminet, G. D. Starkman y J. R. Weeks; Investigación y Ciencia, junio de 1999]. La búsqueda de tales señales no ha dado fruto, pero este resultado negativo no puede interpretarse a favor del multiverso.

Por último, cabría esperar una prueba o una refutación de algunas de las teorías que predicen un multiverso. Quizá las observaciones descarten la inflación caótica, o puede que se descubra alguna inconsistencia matemática o empírica que obligue a abandonar el paisaje de la teoría de cuerdas. En tal caso, los argumentos que conducen a la idea de multiverso quedarían seriamente socavados, si bien el concepto no podría descartarse por completo.

DEMASIADO FLEXIBLE

En definitiva, las pruebas a favor o en contra del multiverso se muestran poco concluyentes. La razón principal se debe a la excesiva flexibilidad de la propuesta: se trata más de un concepto que de una teoría bien definida. La mayoría de los modelos entrañan un crisol de ideas que no llegan a formar un todo coherente. El mecanismo básico de la inflación eterna no implica que la física sea diferente en cada dominio del multiverso; para ello se requiere otra teoría especulativa. Aunque pueden ir de la mano, no se trata de algo inevitable.

La clave para justificar un multiverso reside en la extrapolación de lo conocido a lo desconocido, de lo verificable a lo inverificable, lo que deriva en respuestas diferentes según lo que decidamos extrapolar. Dado que los universos paralelos consiguen explicar casi todo, cualquier observación tiene cabida en una variante u otra. En el fondo, las distintas «pruebas» nos piden aceptar algún argumento teórico en lugar de insistir en la verificación observacional. Pero esto último ha sido hasta ahora el requisito central de la ciencia; si lo abandonamos, hemos de asumir los riesgos. Si relajamos el requerimiento de apoyarnos en datos sólidos, estamos debilitando la razón fundamental del éxito de la ciencia durante los últimos siglos.

Es cierto que una explicación que unifique de forma satisfactoria una serie de fenómenos cuenta con más peso que una mezcolanza de argumentos separados para cada uno. Y si una explicación unificada implicase la existencia de entes inobservables, como universos paralelos, podríamos inclinarnos a aceptar su existencia. Pero un aspecto fundamental radica en la cantidad de entidades no verificables que requiere el modelo. En concreto, ¿necesitamos más o menos que el número de fenómenos que pretendemos explicar? En el caso del multiverso, se supone la existencia de un número enorme —tal vez infinito— de entes inobservables para explicar un solo universo, algo que con dificultad sobrevive a la censura de Guillermo de Ockham: «la pluralidad no debe postularse si no es necesaria».

Los defensores de la idea del multiverso aún esgrimen un último argumento: la ausencia de alternativas satisfactorias. Por muy desagradable que resulte la proliferación de mundos paralelos, si es nuestra mejor explicación, deberíamos aceptarla. O, visto al revés, para abandonarla deberíamos contar con una opción viable. La búsqueda de alternativas depende del tipo de explicación que estemos dispuestos a aceptar. La esperanza de los físicos siempre ha sido que las leyes de la naturaleza resulten inevitables: el mundo es como es porque no podía haber sido de otra manera. Pero esto es algo que jamás hemos podido demostrar. Existen otras opciones. Quizás el universo sea fruto de la pura casualidad. O todo podría estar predestinado, con un propósito o intención subyacente. Pero la ciencia no puede determinar cuál es el caso, ya que se trata de un problema metafísico.

El multiverso se postula para intentar elucidar cuestiones profundas acerca de la naturaleza misma de la existencia, pero, en última instancia, las mismas preguntas fundamentales siguen sin respuesta. Si el multiverso existe, ¿surgió por necesidad, por azar o con algún propósito? Vuelve a tratarse de una cuestión metafísica que ninguna teoría física puede responder.

Si deseamos avanzar, hemos de conservar la idea de que toda ciencia se apoya en la verificación empírica. Necesitamos algún contacto causal con las entidades que proponemos; de otro modo, los límites desaparecen. La conexión puede ser indirecta: si un ente inobservable resulta del todo esencial para explicar fenómenos verificados empíricamente, puede darse a su vez por corroborado. Pero, entonces, la tarea de demostrar esta conexión resulta imprescindible de cara a la cadena de explicaciones. El desafío que planteo a los partidarios del multiverso es, por tanto, el siguiente: ¿puede demostrarse que los universos paralelos inobservables son vitales para explicar el mundo que vemos? ¿Es esta relación ineludible?

A pesar de mi escepticismo, creo que las reflexiones sobre el multiverso proporcionan una oportunidad excelente para meditar sobre la naturaleza de la ciencia y la esencia última de la existencia: ¿por qué estamos aquí? El concepto conduce a ideas novedosas e interesantes, y es, por tanto, un programa de investigación productivo. Para examinarlo hace falta un punto de vista abierto, pero no demasiado. Tiene por delante un delicado camino por hollar. Los universos paralelos podrían existir o no; la cuestión no se encuentra resuelta y tendremos que vivir con la incertidumbre. No hay nada de malo en la especulación filosófica con base científica, que es lo que son las propuestas del multiverso. Pero deberíamos llamarlas por su nombre.

PARA SABER MÁS

Issues in the philosophy of cosmology. George F. R. Ellis en *Philosophy of Physics*, dirigido por Jeremy Butterfield y John Earman. Elsevier, 2006. **arxiv.org/abs/astro-ph/0602280**

Universe or multiverse? Dirigido por Bernard Carr. Cambridge University Press, 2009.

Higher speculations: Grand theories and failed revolutions in physics and cosmology. Helge Kragh. Oxford University Press, 2011.

La realidad oculta: Universos paralelos y las profundas leyes del cosmos. Brian Greene. Crítica (próxima aparición).

Opiniones de Alexander Vilenkin y Max Tegmark a favor de la propuesta del multiverso en: **www.scientificamerican.com/article.cfm?id=multiverse-the-case-for-parallel-universe**



NEUROCIENCIA

TÉCNICAS PARA LA ESTIMULACIÓN DEL APRENDIZAJE

Las últimas investigaciones sobre el cerebro dejan entrever nuevos métodos para mejorar la lectura, la escritura, la aritmética e incluso las destrezas sociales

Gary Stix

Los electrodos registran las señales eléctricas del cerebro de Elise Hardwick, de un año de edad. Elise ayuda a los expertos a averiguar la manera en que los niños procesan los sonidos elementales constitutivos del lenguaje.

ANDREW HETHERINGTON



A Lucas Kronmiller, un bebé de ocho meses, acaban de ajustarle sobre su casi monda cabeza un casco con 128 electrodos. Frente a él, un ayudante intenta entretenerle haciendo pompas de jabón. A Lucas se le ve tranquilo y contento. A pesar de todo, hoy no es un día demasiado especial: desde que contaba cuatro meses ha venido en repetidas ocasiones al Laboratorio de Estudios de la Infancia de la Universidad Rutgers. Al igual que han hecho más de mil pequeños durante los últimos quince años, Lucas está ayudando a April A. Benasich y sus colaboradores a averiguar si, ya en edades tempranas, resulta posible determinar si un niño experimentará en el futuro dificultades con el lenguaje.

Benasich pertenece a un grupo de investigadores que tratan de esclarecer los procesos esenciales subyacentes al aprendizaje a partir de los registros de la actividad cerebral. Una ciencia nueva, la neurodidáctica, busca respuestas a cuestiones que siempre han causado perplejidad entre psicólogos y pedagogos.

¿Qué relación existe entre la destreza de un bebé para procesar sonidos o imágenes y la facultad que ese niño poseerá pocos años después para aprender palabras y letras? ¿Qué conexión guarda la capacidad de atención de un preescolar con su futuro éxito académico? ¿Qué pueden hacer los educadores para fomentar las habilidades sociales entre los más pequeños? Las respuestas a estas preguntas servirán para completar los avances logrados tras años de investigación en psicología y ciencias de la educación. Pero, además, un enfoque basado en la neurociencia debería ofrecer nuevas ideas para mejorar desde la infancia el aprendizaje de tareas como la lectura, la escritura, la aritmética o la adaptación a la compleja red social que constituyen la etapa preescolar y la escuela primaria. Si gran parte de estos estudios se centran en los primeros años de vida, se debe a que es a edades tempranas cuando el cerebro exhibe una mayor capacidad de cambio.

¡EUREKA!

Benasich estudia la manera en que el cerebro de los niños muy pequeños percibe el sonido, un proceso cognitivo fundamental para la comprensión del lenguaje, que, a su vez, resulta básico para la lectura y la escritura. Esta investigadora, una antigua enfermera que ahora cuenta con dos doctorados, se centra en el estudio de lo que ella denomina *instante eureka*: una transición brusca en la actividad eléctrica del cerebro que indica que acaba de percatarse de algo.

En el laboratorio de Benasich, a Lucas y otros niños se les presentan tonos de frecuencia y duración determinadas y se registran las variaciones en las señales cerebrales cuando oyen una frecuencia diferente. En general, un electroencefalograma exhibe un valle como respuesta al cambio, lo que indica que el cerebro ha reconocido algo nuevo. Una demora en el tiempo de reacción a una variación de tono es señal de que el cerebro no la ha detectado con suficiente rapidez. Se ha demostrado que una respuesta cerebral perezosa a la edad de seis meses puede predecir dificultades en el habla entre los tres y los cinco años. Si las diferencias persisten durante los primeros años o en la etapa preescolar, pueden apuntar a problemas en el desarrollo de los procesos cerebrales que ocurren durante la percepción de las unidades básicas del habla. Si un niño de uno o

EN SÍNTESIS

La neurociencia ha comenzado a desentrañar los mecanismos más básicos que operan en el cerebro cuando se adquieren nuevos conocimientos.

Tales estudios podrían derivar en métodos para que bebés y preescolares mejorasen su capacidad de aprendizaje antes de ingresar en la escuela.

Dichas técnicas surtirían grandes efectos sobre las prácticas educativas, al tiempo que podrían emplearse para paliar diversas discapacidades.

No obstante, la neurodidáctica es aún una disciplina incipiente, por lo que se requiere cautela con las promesas de algunos métodos de entrenamiento cerebral.

dos años no alcanza a oír o a procesar con suficiente rapidez ciertas componentes del discurso —un «pa» o un «da»—, puede rezagarse en la «elocución mental» de letras o sílabas, lo que redundaría más tarde en dificultades para leer con fluidez. Estos hallazgos confirman otras investigaciones previas de Benasich, las cuales mostraban que los niños que sufrían dificultades tempranas para procesar estos sonidos obtenían, ocho o nueve años después, peores resultados en tests psicológicos sobre el lenguaje.

Si ya desde la infancia resulta posible detectar problemas futuros en el habla, quizás estos podrían remediarse si se aprovechase la plasticidad inherente a todo cerebro en desarrollo. En ese caso, también debería ser posible mejorar las capacidades de un niño normal. Según Benasich, el momento más favorable para verificar si el cerebro se está organizando de forma óptima para el aprendizaje puede que se sitúe en los primeros meses de vida.

A tal efecto podrían servir los juegos, incluso en la cuna. Benasich y su equipo han diseñado uno que, cada vez que se produce un cambio de tono, enseña a los bebés a volver la cabeza o a desviar la mirada. Cuando el movimiento —que es rastreado por un sensor— es correcto, el niño obtiene como premio unos segundos de vídeo. En un estudio preliminar presentado a finales de 2010, un grupo de quince bebés sanos había conseguido, tras varias semanas de práctica, mejores resultados que un grupo de control. Benasich confía en que sus investigaciones confirmen que el juego puede contribuir a que niños con dificultades para procesar estos sonidos aprendan a responder a ellos con mayor rapidez. Ahora se encuentra negociando con un fabricante de juguetes la fabricación de un móvil para cunas que entrene a los bebés en la percepción de secuencias sonoras rápidas.

MATEMÁTICOS DESDE LA CUNA

El entrenamiento cerebral precoz puede facilitar también el desarrollo de destrezas matemáticas rudimentarias. Stanislas Dehaene, neurocientífico del Instituto Nacional de la Salud y la Investigación Médica de Francia y experto en cognición numérica, ha intentado desarrollar métodos para ayudar a niños con dificultades en el aprendizaje de las matemáticas. Los bebés poseen cierta capacidad innata para reconocer números. Cuando tal destreza no se encuentra presente desde el primer momento, un niño puede experimentar más tarde problemas con la aritmética y

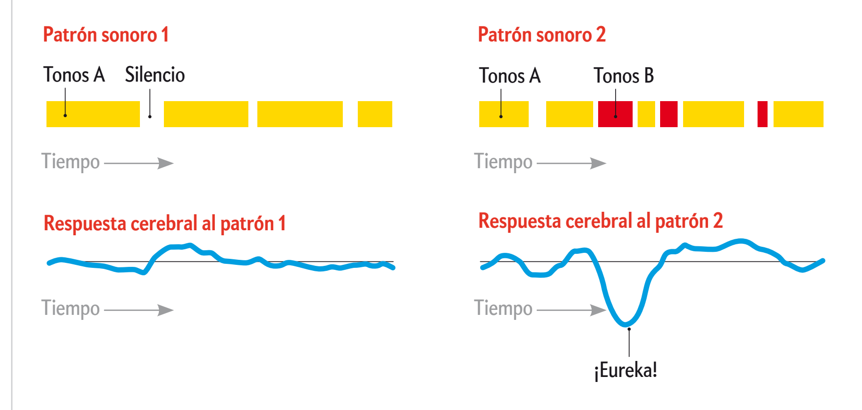
PERCEPCIÓN DE LOS SONIDOS Y LENGUAJE

Entrenar el cerebro para el habla

Científicos de la Universidad Rutgers tratan de averiguar la manera en que el cerebro de un niño responde a ciertos estímulos sonoros (*gráfica superior*). Indagan si un juego que han creado (*debajo*) preparará a los más pequeños para el habla, la lectura y la escritura.

A la espera del «¡eureka!»

En el Laboratorio de Estudios de la Infancia de la Universidad Rutgers se registra la actividad cerebral de los bebés mientras oyen sonidos diferentes. Se les presentan primero tonos de frecuencia elevada (*tonos A*), los cuales provocan una respuesta determinada (*izquierda*). Después, se intercalan tonos de frecuencia distinta (*tonos B*) entre los primeros, lo que induce un desplazamiento momentáneo en las ondas cerebrales (el *instante eureka*), señal de que el cerebro ha detectado el cambio (*derecha*). Una respuesta débil, tardía o nula a esta súbita alteración tonal puede indicar futuros problemas en el habla.



Juego de niños

El equipo de Rutgers ha ideado un método para ayudar a los niños a mejorar el procesamiento de los cambios de tono. El bebé ha de volver la cabeza en respuesta a los tonos B (*izquierda*), pero no así ante los A (*derecha*). Si acierta, se le premia con una escena de vídeo. Poco a poco, el ritmo de las secuencias se acelera. Al final, el niño aprende a responder con éxito a los cambios rápidos.





BRYAN CHRISTIE (*ilustración*), JEN CHRISTIANSEN (*gráficas*); FUENTES: CYNTHIA ROESLER, APRIL A. BENASICH, TERESA REALPE Y NASEEM CHOUDHURY, UNIVERSIDAD RUTGERS

otras habilidades matemáticas. Ejercicios que potenciasen este «sentido para los números», como Dehaene lo llama, podrían evitarle al niño años de dificultades en la escuela.

Esa línea de investigación contradice las teorías de Jean Piaget, quien sostenía que, en lo que respecta al cálculo, el cerebro de un bebé es como una hoja en blanco. Según el psicólogo y epistemólogo suizo, para comprender el concepto de número un niño debía pasar años jugando con bloques, golosinas y otros objetos; solo después lograría entender que, al mover caramelos sobre la mesa, la posición cambia pero el número permanece constante.

La neurociencia ha demostrado que los humanos y otros animales nacen con una cierta noción numérica básica. Por supuesto que un recién nacido no sabe resolver ecuaciones diferenciales; sin embargo, sí se ha observado que los bebés se decantan de manera rutinaria por la hilera que más golosinas tiene y, también, que niños de apenas unos meses ya captan el significado de tamaño relativo. Si ven a alguien ocultar cinco objetos tras una pantalla y, después, esconder otros cinco, manifiestan sorpresa si, cuando se retira la mampara, aparecen solo cinco objetos. Los bebés parecen poseer otras habilidades matemáticas innatas: no solo se muestran campeones en la estimación a ojo, sino que también logran distinguir números exactos, aunque solo hasta el tres o el cuatro. Las investigaciones de Dehaene han resultado clave a la hora de determinar la importancia del surco intraparietal (región del lóbulo parietal alojada en la zona posterior de la coronilla) en la representación de números y cantidades aproximadas.

Dicha capacidad para estimar el tamaño de un grupo, que existe también en delfines, ratas, palomas, leones y monos, constituye probablemente un legado evolutivo necesario para calibrar si nuestro clan debe huir o enfrentarse a un enemigo, o para decidir de qué árbol cuelga más fruta. Junto a Pierre Pica, lingüista del Centro Nacional de Investigación Científica francés, y otros colaboradores, Dehaene ha hallado más pruebas de esta facultad instintiva en estudios con indígenas mundurukú, una tribu de la Amazonia brasileña. Aunque su léxico numérico es muy básico, indígenas adultos lograron decidir si una agrupación de puntos era mayor o menor que otra con casi tantos aciertos como un grupo de control formado por individuos franceses. Sin embargo, la mayoría era incapaz de decir cuántos objetos quedaban si de un conjunto de seis se retiraban cuatro.

Esa capacidad para la estimación supone un punto de partida clave para el desarrollo de habilidades matemáticas más elaboradas. Cualquier déficit en dicha facultad innata puede traducirse en dificultades futuras. Hace unos veinte años, Dehaene conjeturó que los niños se basaban en ese método de estimación a ojo para desarrollar su capacidad de cálculo a medida que iban creciendo. Y, de hecho, durante el último decenio se ha comprobado que los bebés con dificultades en dicha habilidad puntúan después más bajo en los tests escolares de destreza matemática. «Ahora sabemos que el aprendizaje de una disciplina como la aritmética se apoya en cierta clase de conocimiento básico que ya se posee en la primera infancia», afirma Dehaene.

La discalculia (el equivalente de la dislexia en el aprendizaje de las matemáticas) es una discapacidad que afecta a entre el 3 y el 6 por ciento de los niños. Aunque ha recibido mucha menos atención que la dislexia, sus consecuencias no son nece-

ESTIMACIÓN A OJO Y MATEMÁTICAS

Cognición numérica innata

Todos nacemos con una cierta noción de lo que es un número. Muchos niños con deficiencias en esta habilidad experimentan, años después, dificultades con las matemáticas. Stanislas Dehaene y sus colaboradores han creado un juego para reforzar esta capacidad innata para estimar cantidades. Un preescolar debe juzgar qué montón contiene más monedas antes de que un personaje controlado por el ordenador robe el de mayor tamaño (*izquierda*). Después, los personajes avanzan un número de casillas igual al número de monedas que contiene el montón que han escogido (*derecha*). Vence quien llega antes a la meta.





QUICKHONEY (*ilustración*); ADAPTADO DE «PRINCIPLES UNDERLYING THE DESIGN OF 'THE NUMBER RACE,' AN ADAPTIVE COMPUTER GAME FOR REMEDIATION OF DYSCALCULIA», POR ANNA J. WILSON, STANISLAS DEHAENE, PHILIPPE PINEL, SUSANNAH K. REVKIN, LAURENT COHEN Y DAVID COHEN. EN *BEHAVIORAL AND BRAIN FUNCTIONS*, VOL. 2, 2006

sariamente menos graves. Las personas que la padecen «ganan menos, gastan menos, tienen mayores probabilidades de enfermar, de tener problemas con la ley y requieren más ayuda en la escuela», indicaba un artículo publicado en *Science* en mayo pasado.

Al igual que en el lenguaje, también aquí la intervención precoz podría potenciar las facultades matemáticas. Con este objetivo, Dehaene y su equipo han diseñado un juego de ordenador sencillo para entrenar las facultades básicas mencionadas en niños de entre cuatro y ocho años. En una de las versiones, el jugador ha de elegir la mayor de dos cantidades de monedas de oro antes de que un oponente controlado por el programa se apodere de ella. El juego se adapta de manera automática a la destreza del niño, quien, en los niveles más altos, ha de añadir o retirar oro antes de efectuar la comparación que le permita elegir el montón mayor. Si gana, avanza un número de peldaños igual al de monedas obtenidas. Vence quien llega primero al último escalón del tablero.

El programa, de código abierto, ha sido traducido a ocho idiomas. Aunque sus diseñadores se han cuidado de no exagerar los beneficios que pueda producir, más de 20.000 educadores ya lo han descargado desde el servidor de un instituto de investigación público finlandés. Varios estudios intentan ahora determinar su eficacia a la hora de prevenir la discalculia, así como su potencial para ayudar a niños normales a reforzar su sentido numérico básico.

APRENDER A DOMINARSE

Los fundamentos cognitivos de un buen aprendizaje dependen en gran medida de lo que los psicólogos denominan «función ejecutiva», un concepto que abarca atributos cognitivos como la capacidad de mantener la atención, la de retener en la memoria de trabajo —nuestra agenda de notas mental— lo que acabamos de ver u oír, o la de aplazar la satisfacción de un deseo. Todas estas facultades pueden servir para predecir el éxito escolar o incluso el laboral de un individuo. Un famoso experimento realizado en 1972 en la Universidad Stanford («Aquí tienes un caramelo; te daré otro si no te lo comes hasta que vuelva») demostró la importancia de la función ejecutiva: a los niños que, por mucho que deseasen la golosina, lograron esperar les fue mejor en la escuela y, más tarde, en la vida.

Desde hace unos diez años se alienta la idea de que la función ejecutiva puede educarse. Al respecto, un programa edu-

AFIRMACIONES SIN PRUEBAS

Cinco mitos sobre el cerebro

Algunas ideas muy difundidas sobre la manera en que aprenden los niños pueden confundir a padres y educadores.

Mito: Usamos solamente el diez por ciento del cerebro.
REALIDAD: El mito del diez por ciento (elevado a veces hasta el veinte por ciento) ha reaparecido en fecha reciente en la película *Sin límites*, que gira en torno a una droga milagrosa que otorga al protagonista una memoria y capacidad analítica prodigiosas. Los profesores pueden animar a los alumnos a esforzarse más, pero no por ello lograrán accionar circuitos neuronales «vírgenes». No existe ningún interruptor neuronal cuya activación mejore el rendimiento escolar.

Mito: La personalidad depende del mayor uso de uno u otro hemisferio cerebral.
REALIDAD: La opinión de que nuestro hemisferio izquierdo es racional y el derecho, intuitivo y artístico carece de fundamento. En todas las funciones cognitivas participan ambos lados del cerebro. La idea se debe a la observación de que muchas personas (aunque no todas) emplean más el hemisferio izquierdo a la hora de procesar el lenguaje y se sirven en mayor medida del derecho para las destrezas espaciales y emotivas. Algunos psicólogos han esgrimido esta diferencia para explicar los diferentes tipos de personalidad, y no han faltado los planes educativos que abogaban por una menor dependencia de las actividades racionales. Los estudios con imágenes cerebrales no han ofrecido ninguna prueba de que el hemisferio derecho sea el foco de la creatividad. El cerebro se vale de ambos hemisferios tanto en la lectura como en el cálculo.

Mito: Es preciso hablar un idioma antes de aprender otro.
REALIDAD: Los niños que aprenden dos idiomas al mismo tiempo no los confunden ni se desarrollan por ello con mayor lentitud. Esta noción de interferencia lingüística sugiere que diferentes áreas cerebrales se disputarían recursos. En realidad, los niños que aprenden dos idiomas, incluso al mismo tiempo, adquieren un conocimiento más generalizado de la estructura del lenguaje como un todo.

Mito: Los cerebros femenino y masculino difieren en aspectos que dictan facultades de aprendizaje.
REALIDAD: Es cierto que existen diferencias fisiológicas entre los cerebros de uno y otro sexo, y que estas pueden originar cambios en su funcionamiento. Sin embargo, ninguna investigación ha demostrado que existan distinciones por razón de sexo en las redes neuronales que se forman al aprender habilidades nuevas. Y, aunque las hubiese, es probable que fuesen minúsculas y basadas en promedios, por lo que no determinarían las habilidades de ningún individuo en concreto.

Mito: Cada niño posee un estilo particular de aprendizaje.
REALIDAD: La idea de que cada alumno tiende a aprender mejor desde una vía sensorial concreta —el niño «visual» frente al «auditivo»— no cuenta con demasiadas pruebas. En este caso, como en otros, la percepción pública parece haberse adelantado a la ciencia. Uta Frith, antigua directora de una comisión británica encargada de examinar las promesas de la neurodidáctica, insta a padres y educadores a proceder con cautela: «La sociedad reclama información sobre la aplicación de la neurociencia en la educación; como consecuencia, se ha producido una enorme oferta de métodos sin contrastar y carentes de base científica».

Fuentes: *Mind, brain and education science*, por Tracey Tokuhama-Espinosa (W.W. Norton, 2010); *Understanding the brain: The birth of a learning science* (OCDE, 2007); Reunión de Ministros de Educación de la OCDE, 4-5 de noviembre de 2010.

cativo denominado «Herramientas mentales» ha tenido éxito entre las escuelas de algunos barrios desfavorecidos, donde por regla general el rendimiento académico es menor que entre las clases altas. El programa entrena a los pequeños a resistir tentaciones y distracciones, así como a practicar tareas diseñadas para reforzar la memoria de trabajo y la agilidad mental. En un ejemplo de tarea para fomentar la autodisciplina, el niño podía decirse a sí mismo en voz alta lo que debía hacer. El potencial de estas técnicas para mejorar el autocontrol se antoja tan elevado que algunos economistas han propuesto medidas públicas para implantarlas en los centros de educación superior. Según señalaban los autores de un estudio publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* el pasado mes de febrero, dichas medidas servirían para «reforzar la salud física y económica de la población y reducir la delincuencia».

La neurociencia ha venido en respaldo de dicha idea. Algunos estudios recientes parecen indicar que la tediosa práctica de «resistirse a las golosinas» tal vez no sea necesaria: también la educación musical podría resultar eficaz. En sintonía con las tesis de la autora de origen chino Amy Chua, quien en su controvertido libro *Battle hymn of the tiger mother* [«Himno de batalla de la madre tigre», Penguin, 2011] describía su empeño en que sus hijas dedicasen horas interminables a tocar el violín y el piano, algunos experimentos apuntan a que la práctica regular de un instrumento musical mejora el rendimiento escolar. Al parecer, se trata de una actividad que mejora la atención, la memoria de trabajo y el autocontrol.

Algunas de las investigaciones que han facilitado tales hallazgos se deben a un grupo de neurocientíficos encabezados por Nina Kraus, de la Universidad Noroccidental. Kraus, directora del Laboratorio de Neurociencia de la Audición, se crio con un variopinto paisaje sonoro. Su madre, profesional de la música clásica, se dirigía a ella en su italiano natal; hoy, Kraus toca todavía el piano, la guitarra y la batería. «Adoro hacerlo, es una parte muy importante de mi vida», afirma.

Kraus se ha valido de electroencefalogramas para determinar la manera en que el cerebro codifica el tono, el timbre, el ritmo y el tempo de una pieza musical, así como para comprobar si las modificaciones nerviosas que se derivan de la práctica musical mejoran las facultades cognitivas. Su equipo ha hallado que la música refuerza la memoria de trabajo y, lo que tal vez sea más importante, hace de los estudiantes mejores oyentes, una facultad que les permite aislar mejor un discurso en el guirigay que en ocasiones se crea en la clase.

Aún se desconocen los detalles del papel que la formación musical podría desempeñar como tonificante cerebral. Y continúan sin respuesta numerosas preguntas sobre el tipo de ejercicios que ayudarían a reforzar la función ejecutiva. ¿Es relevante que el instrumento sea un piano o una guitarra? ¿Que se trate de una composición de Mozart o de los Beatles? Y lo más importante: ¿les servirán de algo las lecciones de música a los alumnos con dificultades o a aquellos procedentes de familias desfavorecidas? Aunque anecdóticos, Kraus menciona algunos resultados que indicarían que las consecuencias de la formación musical se extienden hasta la escuela o la facultad. En Los Ángeles, el Proyecto Armonía proporciona instrucción musical a niños de familias pobres. Durante los últimos años, docenas de estudiantes han superado con éxito el bachillerato y han ingresado en escuelas universitarias. La mayoría fueron los primeros de sus familias en lograrlo.

Margaret Martin, fundadora del proyecto, ha invitado a Kraus a usar una versión portátil de sus electroencefalógrafos y sus programas informáticos de procesamiento sonoro para investigar en qué medida la música influye en los niños que participan en el programa. Pero Kraus prefiere sin rubor la guitarra a los juegos de ordenador. «Si los estudiantes deben optar entre pasar tiempo con un videojuego que supuestamente refuerza la memoria o con un instrumento musical, a mi entender no hay duda de qué será mejor para su sistema nervioso —afirma—. Para aprender un solo de guitarra, debes memorizarlo y practicar sin pausa una y otra vez hasta que por fin logras reproducirlo.»

PUBLICIDAD EXAGERADA

Al tiempo que prosiguen las investigaciones sobre los mecanismos cerebrales que subyacen a la lectura, la escritura, la aritmética y el autocontrol, numerosos expertos en neurodidáctica intentan evitar que se exageren con fines publicitarios los resultados de sus investigaciones. Por más que deseen que sus hallazgos se traduzcan en métodos de ayuda para los niños, son muy conscientes de todo el camino que aún queda por recorrer. Además, padres y educadores ya se encuentran sometidos a un bombardeo constante de productos para el refuerzo del aprendizaje cuya eficacia está aún por demostrar, por no mencionar algunos muy promocionados que se han mostrado inútiles.

Hace algunos años nació una pequeña industria en torno a la idea de que bastaba hacer escuchar a un bebé una sonata de Mozart para aumentar su inteligencia. Al final, el método se probó fallido. La investigación de Kraus sugiere que, para obtener algún beneficio, es preciso tocar un instrumento y ejercitar las áreas cerebrales responsables del procesamiento sonoro. Cuanto más se practica, más se desarrollan las facultades para distinguir las sutilezas auditivas. La mera escucha no basta.

También se han cuestionado otras técnicas de entrenamiento cerebral que afirman contar con pruebas científicas sólidas de su eficacia. Un metaanálisis publicado en marzo en el *Journal of Child Psychology and Psychiatry* efectuaba una revisión crítica de uno de los métodos de entrenamiento cerebral más conocidos: el programa informático Fast ForWord, desarrollado por Paula A. Tallal, de la Universidad Rutgers; Michael Merzenich, de la Universidad de California en San Francisco, y otros colaboradores. El estudio no halló ningún efecto en niños con dificultades en el habla o en la lectura. Al igual que los métodos utilizados por Benasich, antigua compañera postdoctoral de Tallal, el programa intenta mejorar las deficiencias en el procesamiento de sonidos que pudiesen derivar más tarde en dificultades de aprendizaje. El metaanálisis provocó una enérgica respuesta por parte de Scientific Learning, el fabricante del programa, que argumentó que los criterios de selección habían sido demasiado restrictivos, que la mayoría de los estudios mencionados en el análisis habían sido dudosamente implementados y que, desde la publicación del informe, el programa había sido perfeccionado.

En términos generales, el cliché «es necesario seguir investigando» resulta aplicable a muchas iniciativas en neurodidáctica. El juego aritmético de Dehaene, por ejemplo, aún exige numerosos ajustes. Un estudio reciente mostró que el programa ayudaba a los niños a la hora de comparar números, pero que eso no se traducía en destrezas de recuento o de cálculo aritmético. Se espera que la última versión del juego resuelva estos problemas. Por otra parte, otro estudio ha puesto en duda que la práctica musical mejore la función ejecutiva y que, por lo tanto, desarrolle la inteligencia.

En toda disciplina incipiente, un trabajo contradice a menudo las conclusiones de otro y, después, un tercero refuta las de

El entrenamiento cerebral óptimo

Tocar un instrumento de manera regular desde la infancia fomenta facultades que trascienden la mera práctica musical. Concentrarse en los detalles finos del sonido contribuye a la comprensión del habla y refuerza otras destrezas cognitivas, como la atención, la memoria de trabajo y el autocontrol.

Corteza cerebral

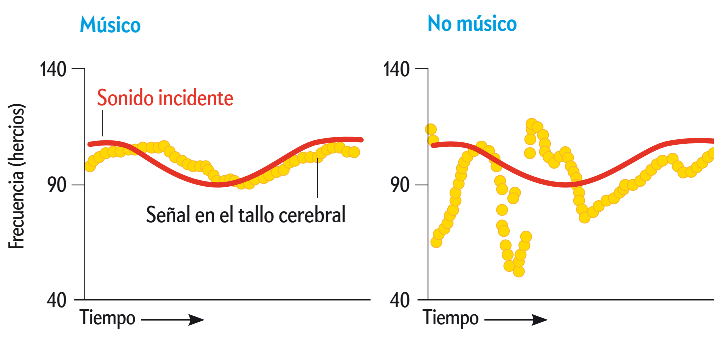
Tallo cerebral

Senda esquemática de la señal

Sonido

Finos de oído

Los músicos perciben los sonidos con mayor nitidez que quienes no lo son, ya que la práctica de un instrumento entrena a todo el cerebro. El sonido viaja desde la cóclea, en el oído interno, hasta el tallo cerebral y, de ahí, se transmite a la corteza, la región del cerebro encargada de algunas de las funciones más complejas. Después, la señal regresa al tallo y a la cóclea. Este bucle implica que, para tocar la nota adecuada, el músico debe emplear varias regiones cerebrales. Los registros de las señales eléctricas en el tallo cerebral (*línea amarilla*) revelan la exquisita sensibilidad tonal de los músicos: estos siguen la evolución de una señal sonora (*línea roja*) con mayor fidelidad que el resto.



ambos. Estos vaivenes ocurren en todas las ciencias y, en ocasiones, desembocan en proclamas desmesuradas. En neurodidáctica, padres y educadores han sido víctimas frecuentes de exageraciones publicitarias relativas a programas informáticos o métodos educativos «con base científica». Como afirma Deborah Rebhuhn, profesora de matemáticas en Center School, una institución de educación especial de Nueva Jersey que acepta alumnos de todo EE.UU.: «Es algo que marea y desconcierta. Ya no sé qué más probar. Y no existen datos suficientes para decirle al director de la escuela que tal o cual sistema resulta eficaz».

PUESTA A PUNTO DESDE PREESCOLAR

Los expertos en neurociencia son conscientes de que aún no pueden ofrecer recetas definitivas para potenciar el aprendizaje. Sus trabajos, no obstante, dejan entrever las posibilidades de las que se beneficiarán las generaciones venideras. Así opina John D. E. Gabrieli, catedrático de neurociencia que participa en un programa conjunto de la Universidad de Harvard y el Instituto de Tecnología de Massachusetts. En un artículo publicado en *Science* en 2009, Gabrieli conjeturaba que, en combinación con los tests psicológicos tradicionales, el historial familiar y, tal vez, ciertos tests genéticos, las pruebas cerebrales detectarán algún día los problemas de lectura a los seis años de edad, permitirán intervenciones tempranas y servirán para prevenir numerosos casos de dislexia.

Se ha demostrado que los electroencefalogramas de niños de preescolar predicen cuál será su habilidad lectora en quinto grado mejor que los tests psicológicos al uso. Combinadas con los métodos tradicionales, las pruebas cerebrales podrían ayudar a calibrar las aptitudes de cada niño antes de que ingresara en la escuela y, en caso necesario, remediar sus deficiencias gracias a los métodos que los neurocientíficos intentan perfeccionar. Si los pronósticos de Gabrieli se hacen realidad, el estudio del cerebro dotará de un nuevo significado al concepto de enseñanza individualizada. Un significado que implicará reforzar la capacidad de aprendizaje antes del primer día de clase.

PARA SABER MÁS

Mind, brain, and education science. Tracey Tokuhama-Espinosa. W. W. Norton, 2010.
La neurodidáctica a examen. Nikolas Westerhoff en *Mente y cerebro*, n.º 44, 2010.
Bases cerebrales del aprendizaje. Ulrich Herrmann en *Mente y cerebro*, n.º 44, 2010.
Maturation of auditory evoked potentials from 6 to 48: Prediction to 3 and 4 year language and cognitive abilities. Naseem Choudhoury y April A. Benasich en *Clinical Neurophysiology*, vol. 122, págs. 320-338, 2011.
The number sense: How the mind creates mathematics. Stanislas Dehaene. Oxford University Press, 2011.
Página web del Laboratorio de Neurociencia de la Audición de la Universidad Noroccidental: **brainvolts.northwestern.edu**
Percepción sensorial y aprendizaje. Burkhart Fischer en *Mente y cerebro*, n.º 50, septiembre de 2011.

BRYAN CHRISTIE (*ilustración*); JEN CHRISTIANSEN (*gráficas*). FUENTE: «MUSICAL EXPERIENCE SHAPES HUMAN BRAINSTEM ENCODING OF LINGUISTIC PITCH PATTERNS», POR PATRICK C. M. WONG, ERIKA SKOE, NICOLE M. RUSSO, TASHA DEES Y NINA KRAUS, EN *NATURE NEUROSCIENCE*, VOL. 10, N.º 4, ABRIL DE 2007

por Eneko Aspillaga, Sandra Navarro y Joandomènec Ros

La flota azul

Las especies del neuston presentan formas y adaptaciones curiosas que les facilitan la vida en la superficie acuática

Los organismos que viven justo encima o debajo de la capa superficial del agua constituyen el neuston: penden de ella o flotan sobre ella, e incluso patinan sobre la tenue película que se forma en la interfase agua-aire. En el océano forman parte del neuston los sargazos, algas flotantes, y su fauna asociada [*véase* «Un mundo flotante: los sargazos», por S. Navarro et al.; Investigación y Ciencia, julio de 2011], que abundan en las áreas tropicales. Pero hay otras especies animales que viven y explotan este nicho ecológico particular que pocos les disputan.

Entre los invertebrados más interesantes del neuston se cuentan ciertos insectos del género *Halobates*, hemípteros patinadores emparentados con los de nuestros ríos, que aprovechan la tensión superficial del agua para deslizarse prestamente sobre ella.

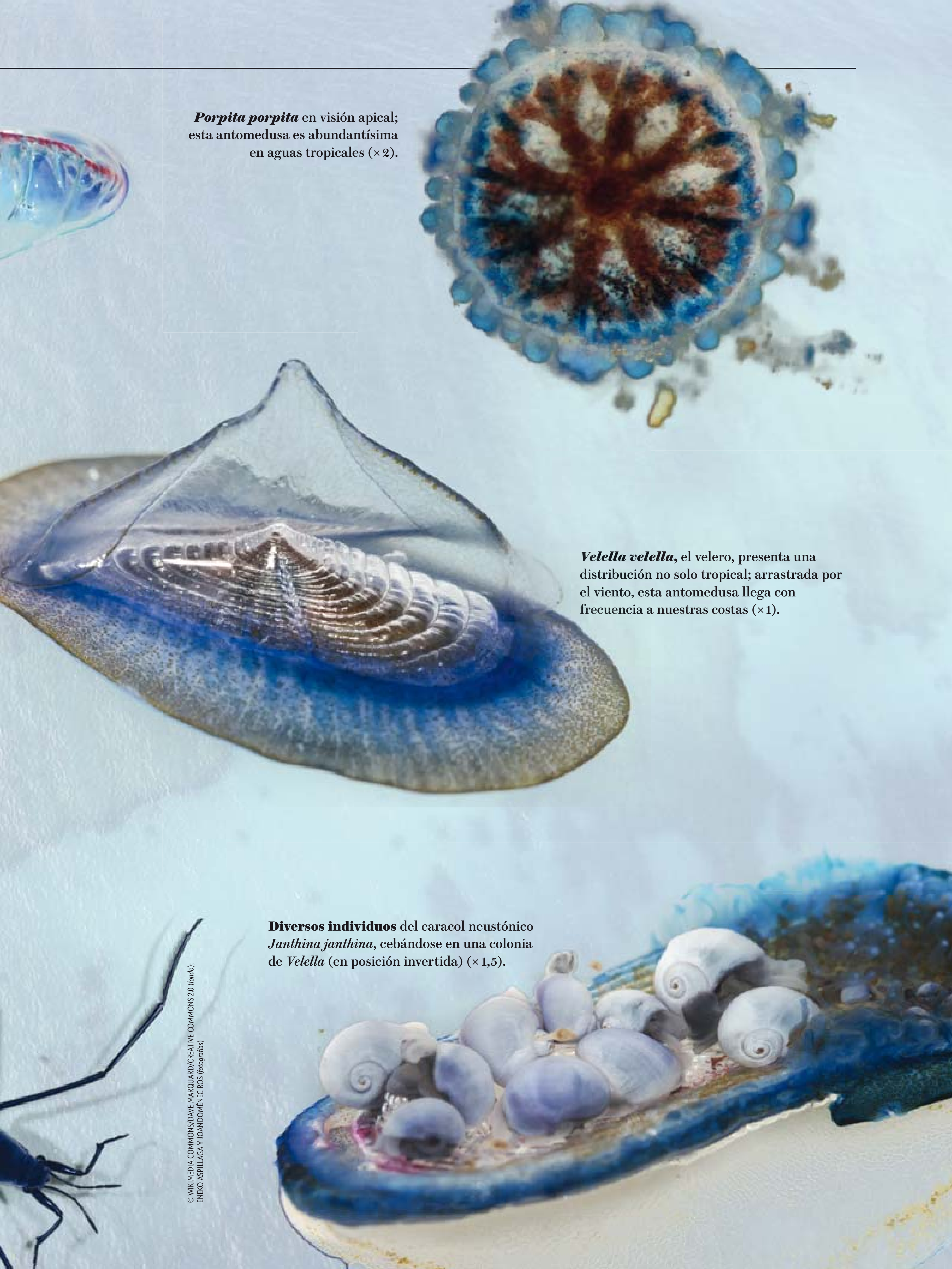
En estas aguas transparentes abundan las especies de color azul intenso, lo que el oceanógrafo sir Alistair Hardy denominó «la flota azul». Se trata de copépodos (pequeños crustáceos), sifonóforos (pólipos), moluscos o peces, cuya coloración azulada no solo les ayuda a camuflarse en el mar de zafiro, sino que les protege de la radiación ultravioleta que alcanza la superficie oceánica.

Porpita, *Velella* y *Physalia* son sifonóforos, colonias de pólipos flotantes que penden de una almadía circular o elipsoidal (los dos primeros géneros), o bien de un saco lleno de gas (*Physalia*, la carabela portuguesa). Mucho antes que los humanos, *Velella* y *Physalia* inventaron la vela, gracias a la cual se desplazan impulsados por el viento. Las especies de ambos géneros presentan morfos con dos orientaciones de la vela, con lo que vientos y corrientes los segregan en áreas opuestas del océano.

Los pólipos de los sifonóforos están especializados en diversas funciones: alimentación, reproducción y defensa. En *Physalia*, se hallan provistos de cnidocistos (cápsulas urticantes) que, además de servirles para inmovilizar a sus presas (peces pelágicos), dejan un desagradable recuerdo a quien entra en contacto con ellos. A pesar de estas defensas eficaces, los sifonóforos del neuston son presa de moluscos, también flotantes, a los que no solo no les afectan los cnidocistos, sino que pueden utilizarlos a su favor: los acumulan íntegros en excrecencias del cuerpo y los liberan si se ven amenazados. Tales son *Janthina*, gasterópodo de concha tenue y violácea, y *Glaucus*, nudibranquio azul y plateado. La belleza de estos moluscos resulta engañosa: *Glaucus*, en especial, es responsable de más de una muerte humana.

***Physalia physalis*, la carabela portuguesa, es un sifonóforo que se mantiene a flote gracias a su gran saco lleno de gas. De él penden tentáculos con los que captura desde copépodos hasta peces (× 1/4).**

***Halobates* sp., hemíptero que patina sobre la agitada superficie de los océanos tropicales, es una de las pocas especies de insectos oceánicos (×3).**



Porpita porpita en visión apical; esta antomedusa es abundantísima en aguas tropicales (×2).

***Velella velella*,** el velero, presenta una distribución no solo tropical; arrastrada por el viento, esta antomedusa llega con frecuencia a nuestras costas (×1).

Diversos individuos del caracol neustónico *Janthina janthina*, cebándose en una colonia de *Velella* (en posición invertida) (×1,5).

por Lee Dugatkin



Lee Dugatkin es experto en la evolución del comportamiento social. Desarrolla su labor investigadora en el departamento de biología de la Universidad de Louisville.

El alce de Jefferson

Thomas Jefferson libró una segunda revolución al combatir la imagen que habían creado los naturalistas europeos de una América degenerada

Aunque a Thomas Jefferson se le conoce sobre todo por haber elegido las palabras que justificaban la independencia de EE.UU., este político y estadista fue también científico. Tal combinación lo llevó a dedicar gran cantidad de tiempo y energía a desacreditar una idea extendida en Europa: que América era un lugar degenerado. Una degeneración se evidenciaba, supuestamente, en la debilidad y el raquitismo de su flora, su fauna y su gente.

Los esfuerzos de Jefferson por ilustrar la total igualdad biológica entre el Nuevo y el Viejo Mundo iban más allá del simple orgullo por el continente patrio; él y otros fundadores creían necesario refutar esa idea para garantizar el desarrollo y la prosperidad de su nuevo país. La cruzada antidegeneración tuvo la suficiente importancia como para que el senador por Nueva York, Samuel Latham Mitchill, en un panegírico a Jefferson durante su funeral en 1826, la comparara con una segunda proclamación de independencia.

Afirmaciones de Buffon sobre la degeneración

La creencia europea de la inferioridad americana surgió en gran medida del naturalista más influyente del siglo XVIII. Georges-Louis Leclerc —conocido como el conde de Buffon— fue posiblemente el científico más famoso de su tiempo. Su *Historia natural* en 36 volúmenes se considera todavía una obra maestra. Su objetivo era proporcionar «la descripción exacta y la historia fiel de cada cosa» sobre la Tierra. *Historia natural* fue un gran éxito. Se convirtió en el tema de conversación de los salones parisinos y fue traducida al inglés, al alemán y al holandés.

En los tomos 9 y 14 de *Historia natural* Buffon sostenía que la mayoría de los animales —y personas— de las Américas eran inferiores a los del Viejo Mundo. Los ecos de esa creencia todavía resuenan. En su libro de 2005 *El enemigo americano: La historia del antiamericanismo francés,* Philippe Roger sostiene que esa actitud francesa «nació y se dio a conocer en los círculos filosóficos» que giraban en torno a Buffon.

La explicación era que las condiciones más frías y húmedas de América provocaban de alguna manera esa degeneración. Aunque había excepciones: Buffon estaba dispuesto a conceder que las ranas —que se decía que llegaban a pesar hasta 17 kilos— así como los insectos, eran más grandes en América. Pero con estos ejemplos se forzaba la regla de la degeneración, puesto que ¿existe algo más desagradable que una rana o un mosquito enormes?

Buffon defendió cuatro tesis relacionadas entre sí. Los animales encontrados en ambos hemisferios eran más pequeños y débiles en el Nuevo Mundo. Los animales que vivían solamente en el Nuevo Mundo eran de alguna manera inferiores a los encontrados solo en el Viejo Mundo. El Nuevo Mundo tenía menos especies. Y, por último, el Nuevo Mundo ocasionó la degeneración del ganado.

Los lectores de *Historia natural* descubrieron que las ovejas criadas en el Nuevo Mundo eran «en general más flacas y su carne menos jugosa y tierna que las europeas». Aprendieron que el Nuevo Mundo contaba solo con la mitad de especies que el Viejo Mundo y con mucha menos variedad. Buffon incluso afirmó que la mayoría de las aves americanas no



Jefferson vio al alce americano, *Alces alces*, como prueba incontrovertible contra la idea europea de que la fauna americana era débil y de tamaño reducido.

RICHARD ROSS

cantaba, falsedad fundamentada en una línea del poema de Oliver Goldsmith de 1769, *La aldea abandonad*a, sobre el paisaje salvaje de Georgia: «Esos espesos bosques donde los pájaros se olvidan de cantar».

Cuando acabó con los animales, Buffon empezó con los indígenas. Los indios americanos no tenían «vivacidad, ni actividad mental». Eran «un tipo de autómata débil, incapaz de mejorar o secundar los propósitos [de la naturaleza]». Así pues, los indígenas americanos fueron *responsables* del mal estado del resto de los ocupantes del Nuevo Mundo. Como no habían sabido domeñar la naturaleza, los nativos no crearon el ambiente propicio para formar ejemplares de fauna más sanos, explicaba el conde.

Buffon nunca salió de Europa. Se fiaba de las publicaciones de historia natural y de los relatos de visitantes. Era una práctica común de viajantes de negocios y misioneros tomar apuntes sobre los animales que encontraban, especialmente sobre las especies hasta entonces desconocidas. El conde comparaba las notas de esos viajeros y extraía una descripción general. Este sistema entrañaba defectos obvios, como el mismo Buffon admitió: los relatos contenían quimeras. Un tal Peter Kalm, enviado por la Academia Sueca para estudiar la historia natural de América, alegó haber visto a una vaca morir a manos de un oso, que mordió la piel al bóvido y, soplando por el agujero de la herida, lo hizo explotar, causándole la muerte. En comparación con estas fantasías, los relatos menos exagerados eran fáciles de aceptar; Buffon utilizó abundante información menos extrema como prueba *prima facie* de degeneración en su *Historia natural*.

La influencia de Buffon

Los descendientes intelectuales de Buffon, como el abad prusiano Cornelius de Pauw y el abad francés Guillaume-Thomas Raynal, consideraban que en el Nuevo Mundo todo era degeneración. El único fallo que le encontraban a Buffon era que no había llegado lo suficientemente lejos. Los abades extendieron el problema a todos los americanos, incluidos los no nacidos en América y a sus descendientes. De Pauw, haciendo caso omiso de los hechos, afirmó que los perros americanos eran «completamente mudos». Es muy posible que, como confidente de Federico el Grande, que no quería que los prusianos fueran a buscar oportunidades en el Nuevo Mundo, De Pauw tuviera motivos personales para difundir esa propaganda.



Conde de Buffon

LEONARD DE SELVA *Corbis*

Raynal, personaje más respetado y complejo que De Pauw, escribió en su obra en ocho volúmenes *Historia filosófica y política de los establecimientos y del comercio de los europeos en las dos indias*: «No deberíamos sorprendernos de que América todavía no haya producido un buen poeta, ni un matemático listo, ni un genio en ninguna de las artes o ciencias». Pero Raynal tuvo la oportunidad de reconsiderar su opinión tras una cena con Benjamin Franklin y otros americanos y franceses a finales de los años sesenta del siglo XVIII.

Franklin, claro está, era un científico de talla mundial cuyo experimento con el rayo, publicado por la Real Sociedad londinense en 1752, se había convertido inmediatamente en un clásico. Franklin le contó a Jefferson cómo había improvisado una prueba de los efectos que provocaba el Nuevo Mundo y éste lo refirió en una carta: «[Raynal] seguía con su teoría favorita de la degeneración de los animales, e incluso del hombre, en América». Franklin se dio cuenta de que los americanos estaban sentados a un lado de la mesa y los franceses al otro. Entonces dijo: «Levantémonos y veamos en qué lado ha degenerado la naturaleza». Todos los americanos sin excepción eran más altos; el abad, en palabras de Jefferson, «un simple renacuajo». (Otro americano presente dijo que cualquiera de ellos podría haber lanzado sin esfuerzo a uno, o incluso a dos franceses por la ventana.)

Raynal, no obstante, publicó la difamatoria primera edición de su *Historia filosófica y política*. Para la tercera edición, sin embargo, se había retractado de sus opiniones anteriores. Por desgracia, las ideas ya habían arraigado en las mentes europeas.

Jefferson responde al conde

Los padres fundadores de los EE.UU. estaban muy familiarizados con Buffon. Una cosa era que los europeos, en especial los franceses, se refirieran a los americanos como advenedizos, descontentos y una amenaza para la corona, porque lo eran; y otra muy distinta decir que todas las formas de vida en América, incluida la población indígena y los inmigrantes europeos, habían degenerado.

Jefferson, el mayor francófono de los fundadores, asumió la responsabilidad de refutar a Buffon y a sus partidarios. Es más, este esfuerzo se convirtió en una obsesión para el apasionado naturalista, que una vez escribió a su hija Marta: «No brota una brizna de hierba que no suscite mi interés».

Jefferson atacó a Buffon con una abrumadora colección de hechos. El capítulo más extenso de sus *Notas sobre el estado de Virginia*, escrito cuando era gobernador, lo dedicó a desmantelar punto por punto la teoría de la degeneración. Incluyó tablas de datos comparativas con las medidas de los animales que rebatían las nociones del conde. Argumentó que las ideas de Buffon eran conceptualmente poco sólidas y los datos que conseguía de viajeros, inexactos.

¿Existían pruebas, preguntaba Jefferson, de que el ambiente del Viejo y el Nuevo Mundo fueran tan diferentes? «Como si ambos lados no los calentara el mismo agradable sol; como si una tierra con la misma composición química fuera menos capaz de elaborar nutrimento animal; como si las frutas y cereales de esa tierra y ese sol [...] redujesen los fluidos y sólidos del cuerpo, o con mayor rapidez produjesen en cartílagos, membranas y fibras esa rigidez que impide todo desarrollo adicional y concluye el crecimiento del animal.» La verdad, escribió Jefferson, «es que las dimensiones de un pigmeo y un patagón, un ratón y un mamut provienen de los mismos jugos nutritivos».

Jefferson no fue el único fundador que saltó a la palestra. John Adams denominó «sueños infames» a las ideas de De Pauw. Además de su demostración en la cena, Franklin disputó el argumento de la humedad. Viajero cosmopolita y recopilador concienzudo de datos, explicó en 1780 que la humedad, una supuesta causa de degeneración, era en realidad más alta en

Europa que en las colonias. Alexander Hamilton, especialmente temeroso del potencial de la teoría de la degeneración para ahogar las relaciones comerciales, defendió América en los *Documentos federalistas*: la única nota a pie de página en el Federalista n.º 11 refuta la afirmación absurda de De Pauw sobre los perros que no ladraban.

Y el futuro sucesor de Jefferson como presidente, James Madison, incluso ejerció de ayudante en la investigación. Una carta que envió a Jefferson en junio de 1786 concluye con una deliberación sobre comadrejas, que incluye datos sobre su tamaño: la especie americana era tan voluminosa como sus equivalentes europeos. Madison escribió a su mentor que este descubrimiento «indudablemente contradice la afirmación [de Buffon] de que de los animales comunes a los dos continentes, los del nuevo son en todos los casos más pequeños que los del viejo». Mientras discutían sobre asuntos como la Convención Constitucional y las necesidades financieras del nuevo país, los dos hombres pensaron a todas luces que combatir a Buffon era de importancia nacional.

La respuesta del *Alces alces*

Jefferson creía que el desmantelamiento metódico de la degeneración en *Notas sobre el Estado de Virginia* no sería más que una solución parcial en su intento de que las ideas no demostradas fueran rechazadas. Quería convencer al propio Buffon de que se retractara públicamente de su teoría. Así pues, antes de salir hacia Francia para ejercer como embajador, Jefferson estaba resuelto a obsequiar a Buffon con un animal americano tan impresionante como para impeler a las lumbreras a cambiar de opinión. Aquí entra el alce (*Alces alces*).

Jefferson empezó su búsqueda de un gran alce enviando a sus amigos un cuestionario con 16 preguntas sobre las costumbres, tamaño e historia natural del animal. Y dejó claro que si los cazadores pudieran procurarle el esqueleto de un alce gigante, él les estaría profundamente agradecido. John Sullivan, general de la guerra de la Independencia y gobernador de New Hampshire, respondió con entusiasmo y quedó encargado del caso cuando Jefferson salió de EE.UU.

Cuando llegó a Francia, Jefferson consiguió una invitación para conocer a Buffon. Conversaron largamente, entre otras cosas, por supuesto, sobre la teoría de la degeneración. El ministro Jefferson le dijo al conde: «El reno europeo podría caminar bajo la barriga de nuestro alce». Jefferson salió de la reunión con la impresión de que el conde «abandonaría la cuestión» de la degeneración si tan solo pudiera ver un alce enorme.


Thomas Jefferson

Por fin, en el invierno de 1786-1787, Jefferson recibió buenas noticias: Sullivan había conseguido los restos de un alce. El Capitán Colburn había matado a un espécimen de más de dos metros de altura en Vermont. Tardaron 14 días en trasladarlo a la casa de Sullivan, quien contrató al capitán de un barco para que transportara al alce en su próximo viaje al extranjero.

Todo iba según lo planeado pero, inexplicablemente, el barco zarpó dejando al alce en el embarcadero. Sullivan comunicó a Jefferson las malas nuevas y este, consternado, creyó que su búsqueda del alce probatorio se había malogrado. Escribió a un amigo que «la caja, los huesos y todo se ha perdido, así que este capítulo de la historia natural quedará en blanco». Lo que Jefferson todavía no sabía era que Sullivan había recuperado el alce y alquilado otro barco. El espécimen llegó a París alrededor del 1 de octubre de 1787.

Jefferson se quedó extasiado. Quería llevar el alce a Buffon personalmente, pero el conde estaba enfermo y no recibía visitas. Se lo envió, pues, al asistente. Parece que Buffon vio el alce, puesto que Jefferson escribió que la criatura gigante «había convencido al Sr. Buffon, que prometió poner las cosas en su sitio en su próximo volumen». Pero Buffon moriría seis meses después sin que se publicara corrección alguna de su teoría. La influyente *Historia natural* promovería para siempre la idea de un Nuevo Mundo degenerado.

Desaparición y legado de la degeneración

La idea de la degeneración americana evolucionó con algunas modificaciones durante al menos los seis decenios siguientes, antes de desvanecerse y reducirse a una pátina de antiamericanismo. Se formaron dos facciones. Por un lado, el filósofo Immanuel Kant y el poeta John Keats aceptaron la degeneración de modo general. Keats describe América como el único lugar donde «la infalible naturaleza parece equivocarse por primera vez». Kant, demostrando una falta de razón pura, escribió sobre De Pauw que «incluso si nueve de cada diez partes de este material carecieran de fundamento o fueran incorrectas, el simple esfuerzo de inteligencia merece ser elogiado y emulado, por hacer que uno piense y no simplemente lea ideas».

Por otro lado, en el bando de Jefferson estaban los escritores Lord Byron, Washington Irving y Henry David Thoreau, y el geógrafo Jedidiah Morse (el padre de Samuel Morse, inventor del telégrafo). Byron dijo que toda América «tenía un clima excelente». Irving critica la teoría de Buffon en *El libro de apuntes de Geoffrey Crayon*, escribiendo: «visitaré esta tierra de maravillas [Europa]... y veré la gigantesca raza de la que he degenerado». Thoreau utilizó su *Caminar* como plataforma «para contraponer la versión de Buffon sobre esta parte del mundo con la realidad». Y Morse desmonta la teoría de la degeneración en las diez primeras páginas del libro de texto de geografía que la primera generación de niños estadounidenses leería en la escuela.

Esos escritores norteamericanos, enfrentándose a la idea de la inferioridad del Nuevo Mundo, forjaron una contranarrativa de América como una región bonita, vasta, rica en recursos y repleta de enérgicos individualistas. La identidad norteamericana hasta hoy —y la reacción del resto del mundo ante esa autoimagen moderna— se remonta en parte al vigoroso descrédito que Jefferson, sus colegas y sus seguidores realizaron de la acusación de la degeneración biológica americana.

PARA SABER MÁS

The american enemy: the history of french anti-americanism. Philippe Roger. University of Chicago Press; 2005.
Mr. Jefferson and the giant moose: natural history of early America. Lee Alan Dugatkin. University of Chicago Press; 2009.

por Neus Barrantes Vidal

Neus Barrantes Vidal es profesora de psicología clínica en la Universidad Autónoma de Barcelona. También imparte clases en la Universidad de Carolina del Norte y es consultora científica de la Fundación Sanitaria Sant Pere Claver.



¿Son solo los genes?

La actual concepción biomédica del trastorno mental acarrea graves consecuencias científicas, clínicas y sociopolíticas

¿Qué causa los trastornos mentales? Según el modelo psiquiátrico predominante, la culpa es de genes defectuosos que producen alteraciones cerebrales, que se traducen en perturbaciones mentales. La psiquiatría confía en que los avances técnicos y una mejor cartografía de los trastornos la convertirán en una suerte de neurología refinada. El modelo bio-psico-social del trastorno mental, que propone un complejo origen multicausal, se ha deformado, pues, en una visión bio-bio-bio. ¿Qué riesgos entraña dicha simplificación? El presidente de turno de la Asociación Americana de Psiquiatría alertaba hace ya más de un lustro de la necesidad de reflexionar sobre esta cuestión.

El modelo bio-bio-bio ha limitado el avance de la psicopatología al asumir que la causalidad del trastorno mental radica exclusivamente en lo bio-genético —el ambiente sería un mero desencadenante— y que el análisis de este nivel de realidad (bio-genético) resulta válido y suficiente para comprender el resto de niveles —como si ver una alteración cerebral permitiera comprender el mecanismo que origina un síntoma o saber como tratarlo—. En consecuencia, la experiencia mental, subjetiva, se considera un epifenómeno cerebral, es decir, un fenómeno accesorio que deriva de la fisiología cerebral y sobre la cual ejerce escasa o nula influencia, teniendo, por tanto, poca importancia su estudio científico y evaluación clínica.

¿Cómo hemos llegado hasta aquí? Las limitaciones teóricas y terapéuticas del ambientalismo radical de la primera mitad del siglo XX (conductismo, psicoanálisis y antipsiquiatría) desprestigiaron gravemente la tesis ambiental. Junto a ello, el espectacular avance que durante los últimos decenios han experimentado la genética y las neurociencias (sobre todo las técnicas de neuroimagen) ha desplazado el péndulo hacia el radicalismo bio-genético. Sin embargo, los resultados no han sido los esperables. Pese a las partidas millonarias que se han destinado a la búsqueda de alteraciones genéticas y cerebrales responsables de trastornos mentales, no es posible citar una alteración biológica o genética específica para ningún trastorno mental. La idea de que sería posible detectar marcadores bio-genéticos a partir de muestras suficientemente amplias de pacientes, ignorando su interacción con el ambiente, ha fracasado.

El avance de la psicopatología requiere una «perestroika» conceptual y una cooperación multidisciplinar que permita afrontar retos filosóficos, epistemológicos y metodológicos. Es necesario estudiar cerebros contextualizados, es decir, atendiendo a su biografía, relaciones y cultura; sobre todo si tenemos en cuenta que una misión crucial del órgano que nos hace humanos es gestionar nuestra adaptación a un ambiente extraordinariamente social y cuya evolución es simbólico-cultural. Somos la especie que nace con mayor inmadurez neuronal, desarrollo cerebral más prolongado e infancia más larga; el ambiente relacional ejerce, por tanto, una gran influencia en el desarrollo de nuestro cerebro-mente. El ambiente no solo *desencadena*; también *genera* vulnerabilidad al trastorno mental.



FOTOLIA (*fotografías*)

En años recientes, estudios epidemiológicos de diversos países han demostrado la importancia de factores de riesgo psicosocial (pobreza, discriminación, aislamiento social), traumas (maltrato infantil), guerra, crianza en urbes superpobladas, disfuncionalidad parental y pérdida temprana de los progenitores. Varios de estos trabajos son de tipo prospectivo (evalúan el supuesto factor causal primero y años después examinan la aparición de síntomas), con lo que evitan posibles atribuciones a una causalidad inversa —que sea el trastorno la causa de exclusión social.

En paralelo, se está empezando a investigar la interacción entre el genoma y el ambiente, cómo el entorno psicosocial esculpe y modifica el cerebro, y cómo el medio regula la expresión de los genes (epigenética). Los resultados están demostrando que el diálogo entre genes y ambiente es más interactivo a lo largo de la vida de lo que se pensaba.

La falta de un auténtico análisis bio-psico-social acarrea graves consecuencias científicas, clínicas y sociopolíticas. Sesga la formación de profesionales y dificulta la financiación de investigaciones integradoras —el desequilibrio presupuestario es enorme—. A nivel asistencial, minimiza la evaluación de la historia vital y la esfera subjetiva, empobreciendo así la comprensión de los problemas, la alianza terapéutica y el éxito del tratamiento. E impide el avance y difusión de un conocimiento que permitiría presionar a los gobiernos para que financiaran programas de prevención primaria.

Para solucionar un problema podemos actuar antes (prevención) o después (tratamientos paliativos) de que este aparezca. Ambas estrategias entrañan un coste posiblemente similar en el plano económico. Pero no en el humano. Sin embargo, pensamos que lo primero es una utopía. Que será más fácil cambiar un gen que las condiciones vitales. Y acabamos distorsionando nuestra mirada y rigor científico. Sería bueno, al menos, ser conscientes de ello.



Marci M. Robinson es micropaleontóloga del Servicio de Inspección Geológica de EE.UU. Comenzó a trabajar en el proyecto Investigación e Interpretación del Plioceno y sus Relaciones Sinópticas en 1994. Actualmente es asesora del Proyecto de Intercomparación de Modelos del Plioceno y editora de la revista especializada *Micropaleontology*.

CLIMATOLOGÍA

Lecciones climáticas del Plioceno

Hace tres millones de años las temperaturas globales eran ligeramente superiores a las de hoy. Las reconstrucciones climáticas de aquel período sirven para poner a prueba los modelos de cambio climático

Marci M. Robinson

En el transcurso de la historia geológica, la temperatura global ha aumentado y disminuido en respuesta a una amplia variedad de factores. Una de las causas principales de los cambios climáticos a escala planetaria ha sido la deriva continental, que en ocasiones ha modificado la circulación en las cuencas oceánicas y ha influido sobre la distribución global de calor. También revisten importancia las variaciones en la órbita terrestre, que gobiernan la alternancia de períodos glaciales e interglaciales. Y lo mismo ocurre con los cambios en la concentración de dióxido de carbono atmosférico, un gas de efecto invernadero que, como tal, retiene el calor. El calentamiento observado hoy en día transcurre con demasiada rapidez como para achacarlo a los dos primeros factores, por lo que la mayoría de los científicos lo atribuyen a una acumulación excesiva de gases de efecto invernadero en la atmósfera, debida, sobre todo, a la quema de combustibles fósiles.

¿Cómo repercutirá lo anterior en nuestro futuro? Responder a esta pregunta constituye gran parte de la labor del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), la institución que cada cinco o seis años sintetiza un gran volumen de investigación climática en una sola memoria. El Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, elaborado en 2007, predijo que el promedio anual de la temperatura en todo el mundo habrá aumentado entre 1,1 y 6,4 grados centígrados para finales de siglo. Para llegar a tales conclusiones se emplearon modelos de circulación general, simulaciones numéricas a escala planetaria que integran procesos oceánicos, atmosféricos, criosféricos y superficiales.

Por supuesto, un abanico tan amplio de posibilidades implica consecuencias de lo más dispares. Un clima en el que la temperatura promedio supere en un grado a la actual probablemente resulte muy distinto de uno seis grados más cálido. Podría tratarse de una diferencia entre 18 o 59 centímetros en la elevación del nivel del mar, por ejemplo. ¿Qué fiabilidad alcanzan los resultados de los diferentes modelos? ¿Cómo cuantificar su incertidumbre?

Una de las vías para formarse una imagen más certera del futuro consiste en estudiar con detalle el pasado; en particular, épocas en las que las temperaturas globales coincidiesen con las que quizá se alcancen a finales de este siglo. El registro de mediciones directas de temperaturas abarca solo hasta 1850,

EN SÍNTESIS

Durante el Plioceno, hace unos tres millones de años, las temperaturas eran unos tres grados más altas que hoy y los niveles de CO_2 atmosférico se asemejaban a los actuales.

Sin embargo, la posición de los continentes y los patrones de las corrientes oceánicas, las cuales distribuyen el calor, eran muy similares a los de hoy.

Varios indicadores climáticos permiten deducir las características climáticas del Plioceno; entre ellos, las conchas de microfósiles, las alquenonas o el polen fósil.

La reconstrucción del clima del Plioceno resulta de extremada utilidad para afinar los modelos computacionales que se proponen estudiar el cambio climático actual.



Tripulación del buque oceanográfico *JOIDES Resolution* en 2005. Sus miembros preparan una sonda de pistón durante una expedición del Programa Integrado de Perforación Oceánica (IODP) en el Atlántico Norte. Los sedimentos recuperados en este tipo de misiones resultan cruciales para deducir las condiciones climáticas durante el Plioceno medio, hace unos tres millones de años. Dicha época se caracterizó por unas temperaturas globales similares a las que se podrían alcanzar a finales de siglo y por unos niveles de dióxido de carbono atmosférico próximos a los actuales.

CORTESÍA DE W. S. CRAWFORD Y EL IODP

por lo que no se remonta lo suficientemente lejos. Los testigos de hielo permiten estimar las concentraciones pasadas de dióxido de carbono atmosférico, pero no más allá de hace unos 800.000 años. Sin embargo, algunos estudios basados en otros indicadores climáticos, como las proporciones de elementos químicos en fósiles marinos diminutos, están arrojando luz sobre algunos interrogantes. De hecho, sus resultados comienzan a considerarse un punto de referencia para quienes intentan modelizar el clima futuro.

INDICADORES DEL PLIOCENO

El mejor indicador del que disponemos para identificar épocas pasadas más cálidas que la actual lo constituye el registro de los isótopos de oxígeno marino. Este se basa en la proporción de ^{16}O y ^{18}O presentes en las conchas de microfósiles. La evaporación preferencial del isótopo más ligero, el ^{16}O, provoca que el agua marina se enriquezca en ^{18}O, mientras que parte del agua evaporada se incorpora a la nieve que compone las capas de hielo. Por tanto, durante los períodos fríos, las capas de hielo se expanden e incorporan el isótopo ligero, al tiempo que disminuye el nivel del mar y el océano se enriquece en el isótopo pesado.

Los organismos marinos registran la composición isotópica del océano cuando sus conchas calcáreas precipitan. Las conchas formadas en períodos glaciales presentan una mayor proporción de oxígeno pesado que las secretadas en períodos interglaciales. Debido a que las variaciones en la composición isotópica son sincrónicas en todos los océanos, resulta posible

Reconstruir el pasado

Las características del clima pasado se deducen mediante el análisis de diversos indicadores climáticos (*proxies*).

Crecimiento de los árboles

Las temperaturas de los últimos 1500 años se han reconstruido, sobre todo, a partir del estudio de los anillos de crecimiento de los árboles (dendrocronología). Desde la segunda mitad del siglo XIX, los datos se corresponden con mediciones directas de termómetros. El área sombreada muestra el intervalo de calentamiento estimado para finales del siglo XXI según el IPCC.

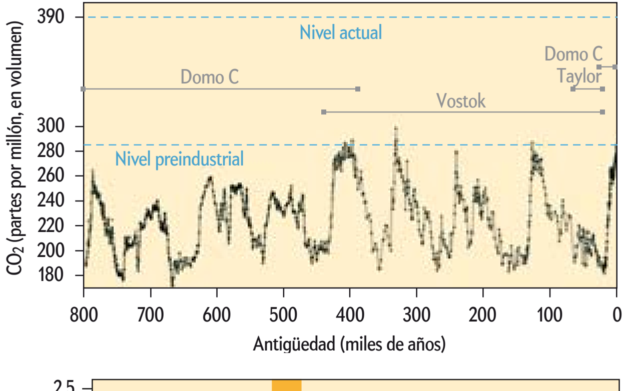
Intervalo de aumento de temperaturas según las predicciones del IPCC para finales de siglo

Variación de la temperatura media anual (Celsius)

Año

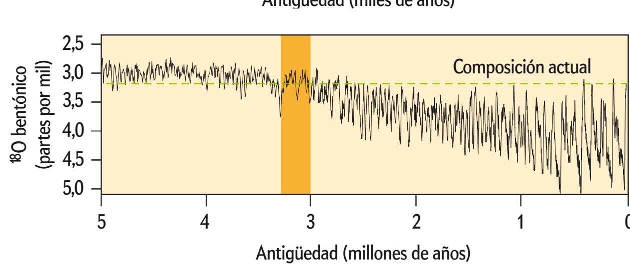
CO_2 atmosférico

Las concentraciones de CO_2 atmosférico representadas aquí se han calculado a partir de testigos de hielo extraídos en tres puntos de la Antártida (*nombres en la gráfica*). Las líneas discontinuas indican los niveles de CO_2 actuales y los de la época preindustrial.



^{18}O oceánico

Otro indicador climático lo aporta la composición isotópica del oxígeno del agua de mar: durante las épocas frías, los océanos se enriquecen en ^{18}O. La línea discontinua indica la composición actual.



correlacionar los registros isotópicos de distintos puntos del planeta. La enorme cantidad de conchas analizadas hasta hoy comprende un período de millones de años de antigüedad. Su estudio ha proporcionado un registro de isótopos de oxígeno que permite calcular de manera aproximada la variación global de las temperaturas y del nivel del mar.

Según este registro, el Plioceno medio (hace unos tres millones de años) fue la época más reciente que presentó temperaturas globales similares a las que se prevén para finales de siglo. Tres millones de años puede parecer un pasado muy remoto, pero no lo es en términos geológicos. En aquella época, la posición de los continentes era casi idéntica a la actual, por lo que las corrientes oceánicas (el principal vehículo de transferencia de calor) no diferían demasiado de las actuales. Además, la mayoría de las plantas y animales del planeta ya habían evolucionado, lo que facilita la comparación entre los organismos vivos de hoy y sus correspondientes ejemplares fósiles. Esta simetría convierte al Plioceno en un modelo excelente de lo que podría ser nuestro futuro.

Las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico durante el Plioceno apenas superaban a las actuales. Aun así, las temperaturas eran de dos a tres grados más altas que en la actualidad, y el nivel del mar, unos 25 metros más alto. Esta aparente paradoja —un planeta más caliente con una concentración similar de CO_2— inquieta a quienes se preguntan si incluso un pequeño aumento en los niveles de CO_2 bastaría para alterar el clima de manera significativa.

Hacia la década de 1970, el climatólogo Mijaíl Budyko comenzó a estudiar el Plioceno medio con el cambio climático en mente, si bien a él le impulsaba más el optimismo que la alarma: concluyó que un mundo calentado por gases de efecto invernadero beneficiaría a algunas regiones de la Unión Soviética. Budyko fue el primero en considerar las reconstrucciones de períodos anteriores más cálidos como herramienta para predecir las condiciones climáticas del siglo XXI. Tras un intercambio científico entre EE.UU. y la Unión Soviética en el que Budyko presentó una reconstrucción climática, Dick Poor, del Servicio de Inspección Geológica estadounidense (USGS), y David Rinde, de la NASA, sugirieron que el USGS obtuviera un conjunto de datos más cuantitativos sobre el Plioceno. Desde su creación en 1989, el proyecto Investigación e Interpretación del Plioceno y sus Relaciones Sinópticas (PRISM) del USGS ha llevado a cabo una evaluación sin precedentes sobre cómo podría ser un planeta más cálido que el actual.

MÉTODOS PARA RECONSTRUIR EL CLIMA

El *actualismo* constituye un principio fundamental en geología. Según este, los procesos físicos y las leyes naturales que actúan en el presente son los mismos que operaron en el pasado. A partir de ciertas premisas sobre la estabilidad de la química oceá-

AMERICAN SCIENTIST (gráficas); JOZE POBIC/ISTOCKPHOTO (anillos de árbol)



Los técnicos del proyecto Investigación e Interpretación del Plioceno y sus Relaciones Sinópticas (PRISM) extraen microfósiles de un testigo de sedimentos. La determinación de las especies de dichos microfósiles permite acotar la edad de los materiales depositados a lo largo de la llanura costera de Virginia.

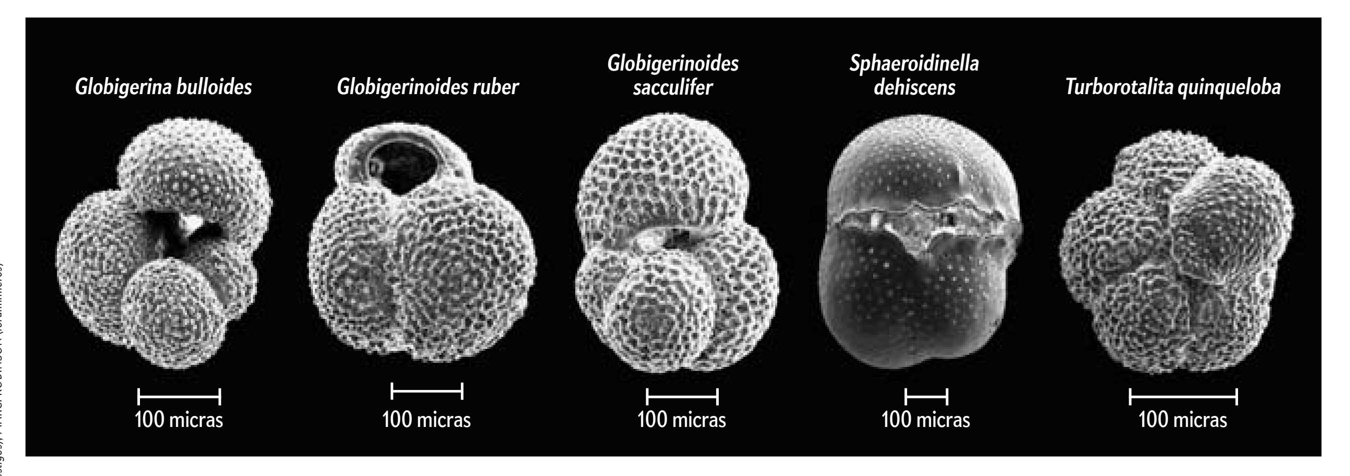
nica y las tolerancias ecológicas de las especies, la paleontología permite deducir las condiciones ambientales pasadas en algunas regiones del planeta. La combinación de varias reconstrucciones de un mismo período en zonas geográficas diferentes proporciona una visión conjunta de las condiciones terrestres en el pasado.

Este tipo de reconstrucciones climáticas parte del muestreo de sedimentos a escala planetaria. En el caso de los sedimentos de las profundidades oceánicas, la mayoría de las muestras proceden de los sondeos efectuados por el Programa Integrado de Perforación Oceánica (IODP) y sus predecesores. El proyecto, coordinado por autoridades estadounidenses y japonesas, recibe también financiación de un consorcio europeo, China, Corea, Australia, Nueva Zelanda e India. Cualquier investigador puede solicitar muestras del IODP. Durante sus expediciones, se taladran cientos o miles de metros en el fondo oceánico a fin de recuperar sedimentos que abarcan períodos de tiempo de millones de años [*véase* «Viaje al manto terrestre», por Damon Teagle y Benoît Ildefonse; Investigación y Ciencia, septiembre de 2011]. La profundidad a la que se encuentran los fósiles del Plioceno se determina mediante diversas técnicas de datación.

Los sondeos marinos suelen presentar un alto contenido en foraminíferos planctónicos, organismos unicelulares que flotan en la superficie o cerca de ella. Cada una de las casi cuarenta especies que existen presenta una concha calcárea de forma y ornamentación únicas, lo que facilita su identificación. Todas son del tamaño de un grano de arena. Puesto que cada especie vive bajo unas condiciones ambientales muy específicas, los fósiles hallados en los sondeos revelan la temperatura y otras características, como la salinidad o la productividad, del entorno en que habitaron los foraminíferos.

Supongamos que el 60 por ciento de los organismos presentes en una asociación fósil pertenecen a una especie y el 40 por ciento, a otra. Si hoy esa misma asociación habita en una zona donde el agua se encuentra a 14 grados centígrados, se asigna a la muestra esa temperatura. Sin embargo, lo más probable es que la muestra contenga unas cuarenta especies y que hoy dicha asociación habite en un amplio intervalo de temperaturas oceánicas. El valor más aproximado para la asociación se calcula entonces mediante una combinación de temperaturas. Una técnica denominada «análisis de factores» resulta también de utilidad: a partir de los datos de las asociaciones actuales y sus respectivos ambientes, se realiza una regresión multivariante que se aplica después a los datos paleontológicos. Este método permite determinar la temperatura aproximada del ambiente en el que habitó la asociación.

La mayor parte de las temperaturas oceánicas de nuestras reconstrucciones se han calculado a partir de datos de foraminíferos, aunque también se emplean a tal efecto otros microfósiles, como diatomeas, radiolarios, ostrácodos y polen. Otro método utilizado para estimar paleotemperaturas consiste en el estudio de otras propiedades químicas de las conchas de foraminíferos y ostrácodos. Aunque estos caparazones se compo-



USGS/PRISM (*testigos*); MARCI ROBINSON (*foraminíferos*)

Los foraminíferos planctónicos, organismos marinos unicelulares, poseen conchas calcáreas que se conservan entre los sedimentos del Plioceno medio. Cada especie habita bajo condiciones muy específicas y presenta una concha de apariencia única, por lo que sus fósiles sirven como indicadores climáticos.

nen sobre todo de calcio, carbono y oxígeno, también incluyen una pequeña proporción de magnesio, ya que los iones de este elemento pueden sustituir a los de calcio en la red cristalina del carbonato cálcico. La velocidad de sustitución se halla en estrecha correlación con la temperatura del agua en el momento en que se secreta la concha. Así, la aplicación de este método tanto en fósiles del fondo oceánico como en otros de aguas más superficiales permite reconstruir gradientes térmicos oceánicos. Las alquenonas revisten un interés similar. Estos compuestos orgánicos de cadena larga son sintetizados por ciertas algas que habitan en las proximidades de la superficie oceánica. El número de enlaces dobles de carbono en dichas cadenas (grado de insaturación) varía linealmente con la temperatura del agua en la que crecen. Este método proporciona una estimación de la temperatura oceánica independiente de los métodos basados en microfósiles.

En la reconstrucción del Plioceno medio elaborada por el proyecto PRISM se consideran también datos relativos a la vegetación, el hielo continental, el nivel del mar, la temperatura de las aguas oceánicas profundas y la topografía. En tierra firme, la distribución de la vegetación y el hielo continental se deduce a partir de los análisis de polen fósil. Aunque la extensión de hielo sobre Groenlandia y la Antártida no guarda una estrecha relación con la distribución de la vegetación, el volumen de hielo sí supone un indicador del nivel del mar durante el Plioceno. Los restos geológicos de las líneas de costa pliocena también aportan datos. Por ejemplo, el escarpe de Orangeburg, en EE.UU., que se extiende desde Florida hasta Virginia, delimita lo que fue la costa atlántica durante el Plioceno. Hoy, la carretera 95 bordea el este del escarpe.

VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

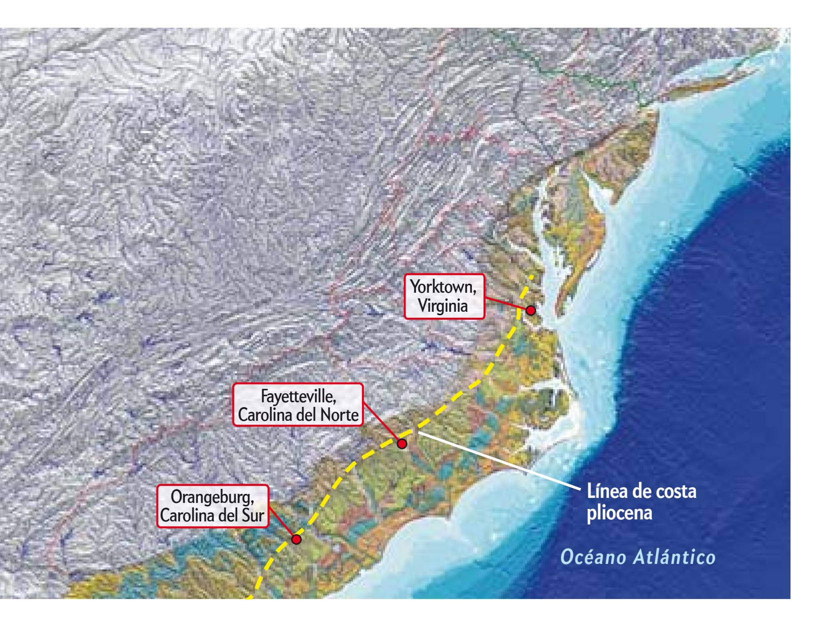
Hasta el momento, el proyecto PRISM ha reconstruido el clima del Plioceno medio a partir de datos procedentes de 86 puntos marinos y 202 continentales. El resultado se muestra muy distinto del clima actual en algunas regiones y muy similar en otras. Mientras que las temperaturas ecuatoriales del Plioceno se asemejaban a las de hoy, las de los polos eran más elevadas. En general, la diferencia entre temperaturas pasadas y presentes resulta tanto más acentuada cuanto mayor es la latitud. En Islandia y Groenlandia crecían bosques boreales en lugar de tundra polar, lo que indica que la temperatura media anual en el océano Ártico y en el Atlántico Norte debió superar en al menos 10 grados a la actual. En el hemisferio sur, la vegetación arbustiva poblaba la península antártica occidental y las costas de la Tierra de Wilkes, donde en la actualidad no hay sino hielo.

Por otro lado, la mayor parte de los trópicos se encontraba a temperaturas similares a las que vemos hoy. En la región tropical del Pacífico Occidental, cerca de Papúa Nueva Guinea, las aguas superficiales eran tan cálidas como en la actualidad (unos 29 grados Celsius). En el presente, las temperaturas superficiales en la región occidental del Pacífico suelen ser algo más elevadas que las de la zona oriental. Este gradiente solo se suaviza con la llegada de El Niño, un fenómeno cuasiperiódico que genera un patrón de temperaturas más cálido de lo normal y que trae consigo alteraciones meteorológicas a escala planetaria. Durante las épocas más cálidas del Plioceno, el estado habitual se asemejaba al de El Niño de nuestros días. La región ecuatorial del Pacífico Oriental, cerca de Panamá, Colombia y Ecuador, era tan cálida como las zonas occidentales.

Hoy, las costas de Perú y California se caracterizan por la presencia de corrientes frías ascendentes y muy ricas en nutrientes, lo que las convierte en excelentes regiones pesqueras. Según los indicadores de productividad, las aguas ascendentes del Plioceno eran también ricas en nutrientes; sin embargo, a diferencia de las actuales, eran unos 7 grados más cálidas. Para comprender mejor las corrientes cálidas ascendentes del Plioceno, la reconstrucción del proyecto PRISM está incorporando datos procedentes de 27 puntos nuevos, la mayoría ubicados a lo largo de estos márgenes continentales. Aunque el océano Índico se halla mucho peor representado en la reconstrucción del PRISM, se espera que esta situación mejore tras la inclusión de seis nuevos puntos de obtención de datos. Otra línea de investigación reciente intenta contextualizar desde un punto de vista histórico el dipolo de temperaturas que se observa hoy en el océano Índico. Se trata de otro fenómeno episódico responsable de un acentuado gradiente de temperaturas y que influye sobre los fenómenos meteorológicos locales y sobre el clima de la región.

Cada vez más, un método para comprobar la precisión de los modelos climáticos consiste en aplicarlos al Plioceno y contrastar sus resultados. En 2004, se observó una discrepancia entre las temperaturas ecuatoriales del Pacífico Oriental estimadas por el PRISM y las calculadas por el Modelo Acoplado del Centro Hadley (HadCM3). La precisión de este modelo reviste sumo interés, puesto que se ha empleado en un gran número de predicciones climáticas y estudios de sensibilidad. En su simulación, HadCM3 había obtenido que, durante el Plioceno, las aguas situadas al oeste de Panamá, Colombia y Ecuador eran más cálidas que hoy. Sin embargo, la reconstrucción del PRISM no contemplaba este resultado.

Esta discrepancia motivó a Harry Dowsett, micropaleontólogo del PRISM, y a la autora a investigar las causas. En los re-

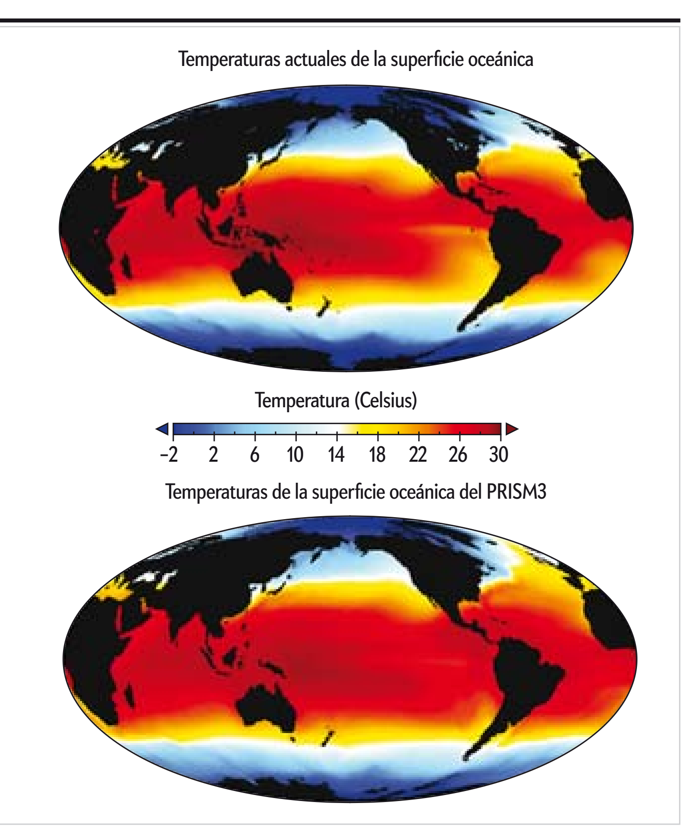


Durante el Plioceno, la línea de costa (*amarillo*) de lo que hoy es el sudeste de EE.UU. se hallaba desplazada con respecto a la presente. Los datos geoquímicos y geológicos indican que hace tres millones de años el nivel del mar se elevaba 25 metros por encima del actual. La antigua línea de costa se corresponde con el escarpe de Orangeburg, un elemento topográfico esculpido por la erosión marina del Plioceno medio que se extiende desde Florida hasta Virginia.

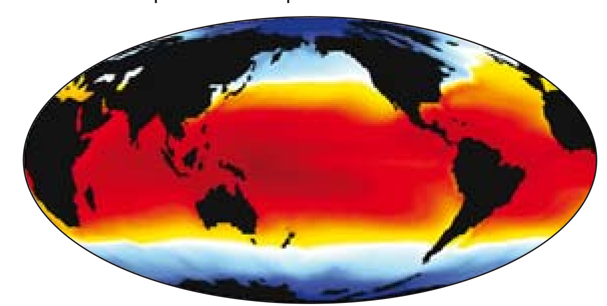
AMERICAN SCIENTIST

El Pacífico, ayer y hoy

La distribución actual de temperaturas superficiales del océano Pacífico (*arriba, derecha*) se caracteriza por la existencia de un gradiente térmico este-oeste en las latitudes ecuatoriales. En un primer momento, la reconstrucción pliocena del PRISM2 (*debajo, izquierda*) reprodujo en esta región unas condiciones de temperatura similares a las modernas. Después, un modelo climático indicó que el gradiente térmico debió ser menos acusado, circunstancia que fue corroborada por indicios geoquímicos posteriores. La reconstrucción posterior del PRISM3 (*debajo, derecha*) se ajustó según los nuevos datos.







AMERICAN SCIENTIST

gistros del IODP hallamos tres testigos que contenían sedimentos pliocenos de la región ecuatorial, entre 0 y 6 grados de latitud norte o sur. Uno de ellos se había extraído muy cerca de la costa occidental de América del Sur, a 84 grados de longitud oeste. Los otros dos se habían perforado a 95 y 110 grados de longitud oeste. Realizamos un estudio de las asociaciones de foraminíferos planctónicos de los tres testigos, así como de las alquenonas procedentes del punto más oriental, que hoy se encuentra en una zona de corrientes ascendentes. Nuestro análisis mostró que se habían subestimado las temperaturas del Plioceno en dicha región. El punto situado más al oeste indicaba temperaturas 2,5 grados superiores a la media actual; el punto intermedio, 2,8 grados por encima (un dato que concordaba de manera asombrosa con otras observaciones), y el más oriental indicaba temperaturas pliocenas entre 1,5 y 1,9 grados más cálidas que las actuales. El modelo climático había acertado en sus proyecciones.

En otra ocasión, la reconstrucción del PRISM revelaba un clima muy cálido en las proximidades de Islandia y las islas Svalbard, mientras que las simulaciones de 2004 del HadCM3 no reflejaban esta circunstancia. Para esclarecer esta divergencia, estudiamos los patrones de circulación oceánica y la evolución del fondo oceánico en esta región desde el Plioceno.

Las aguas profundas del Atlántico Norte se originan cuando el agua superficial fría, salada y más densa se hunde al norte de Islandia. La dorsal escocesa, un elemento topográfico asociado al punto caliente situado en Islandia y que conecta Groenlandia, Islandia y Escocia, retiene el agua profunda recién formada en su camino hacia el sur. En la década de los setenta, Peter Vogt llevó a cabo un estudio geofísico pionero que demostró que, durante el Plioceno, la dorsal escocesa era más baja que hoy. La actividad geotérmica bajo Islandia ha provocado que la dorsal se eleve unos 300 metros durante los últimos tres millones de años. Estudios posteriores realizados por Jim Wright y Ken Miller, de la Universidad Rutgers, han demostrado que estos cambios han afectado a la circulación de las aguas profundas. Estas variaciones han sido incorporadas en un estudio piloto publicado este año por la autora junto a otros colaboradores. Al final, el reajuste de las condiciones de contorno del modelo climático permitió reconciliar los datos reconstruidos con el resultado de la simulación.

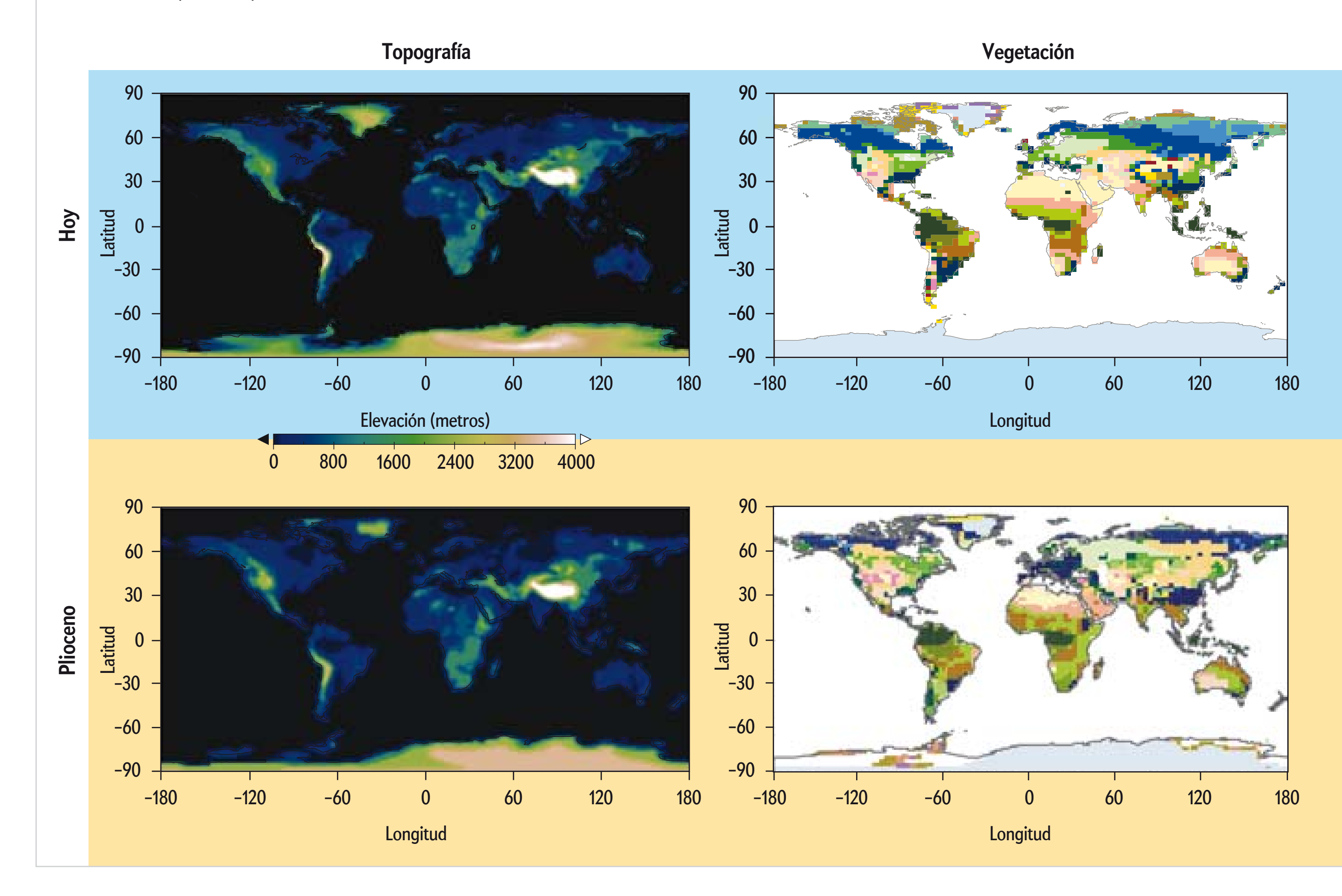
El cotejo entre las observaciones y los resultados de los modelos climáticos constituye un paso indispensable para aumentar la fiabilidad de las simulaciones del clima futuro. No obstante, estas comparaciones se hallan aún en desarrollo. Por un lado, algunos aspectos del procedimiento resultan muy delicados y requieren mayor consideración; por otro, aún han de resolverse algunas diferencias básicas entre los modelos y las reconstrucciones. Entre otras cuestiones, resultan problemáticas la definición de «momento presente» y la implementación de los ciclos térmicos estacionales. Otro inconveniente radica en que las reconstrucciones se basan en datos tomados solo en ciertos puntos geográficos. Tanto los sondeos marinos como los terrestres se distribuyen de manera irregular por el planeta, con agrupaciones más densas en el Atlántico Norte y en Europa occidental. Por lo tanto, para estimar las temperaturas deben realizarse varias extrapolaciones. La región central del Pacífico Sur representa el área más extensa en la que no existen registros.

Por otra parte, tanto los indicadores climáticos como los modelos requieren partir de una serie de suposiciones. Por ejemplo, se postula que las tolerancias ecológicas de cada especie de foraminíferos y de los organismos productores de alquenonas no han variado demasiado desde el Plioceno; asimismo, se supone que entonces habitaban en los mismos medios que hoy. Además, al elaborar un modelo se da por sentado que los pará-

TOPOGRAFÍA, VEGETACIÓN Y TEMPERATURAS

Diferencias entre el Plioceno y la actualidad

Las últimas reconstrucciones del PRISM sobre el clima del Plioceno medio manifiestan una serie de diferencias entre dicha época y la actualidad. En América del Norte, el extremo septentrional de las montañas Rocosas era topográficamente más bajo y los Grandes Lagos no existían. En la región central y oriental de Europa abundaban los bosques templados (con taxones subtropicales), mientras que en África y Australia se extendían sabanas y bosques tropicales. Las zonas actuales de tundra exhibían entonces vegetación de taiga perenne, un bioma caracterizado por bosques de coníferas.



metros que gobiernan los fenómenos climáticos, como la formación de nubes, pueden definirse matemáticamente. Ello no obstante, sin estas premisas no podríamos llevar a cabo nuestra labor científica.

CUANTIFICAR LA INCERTIDUMBRE

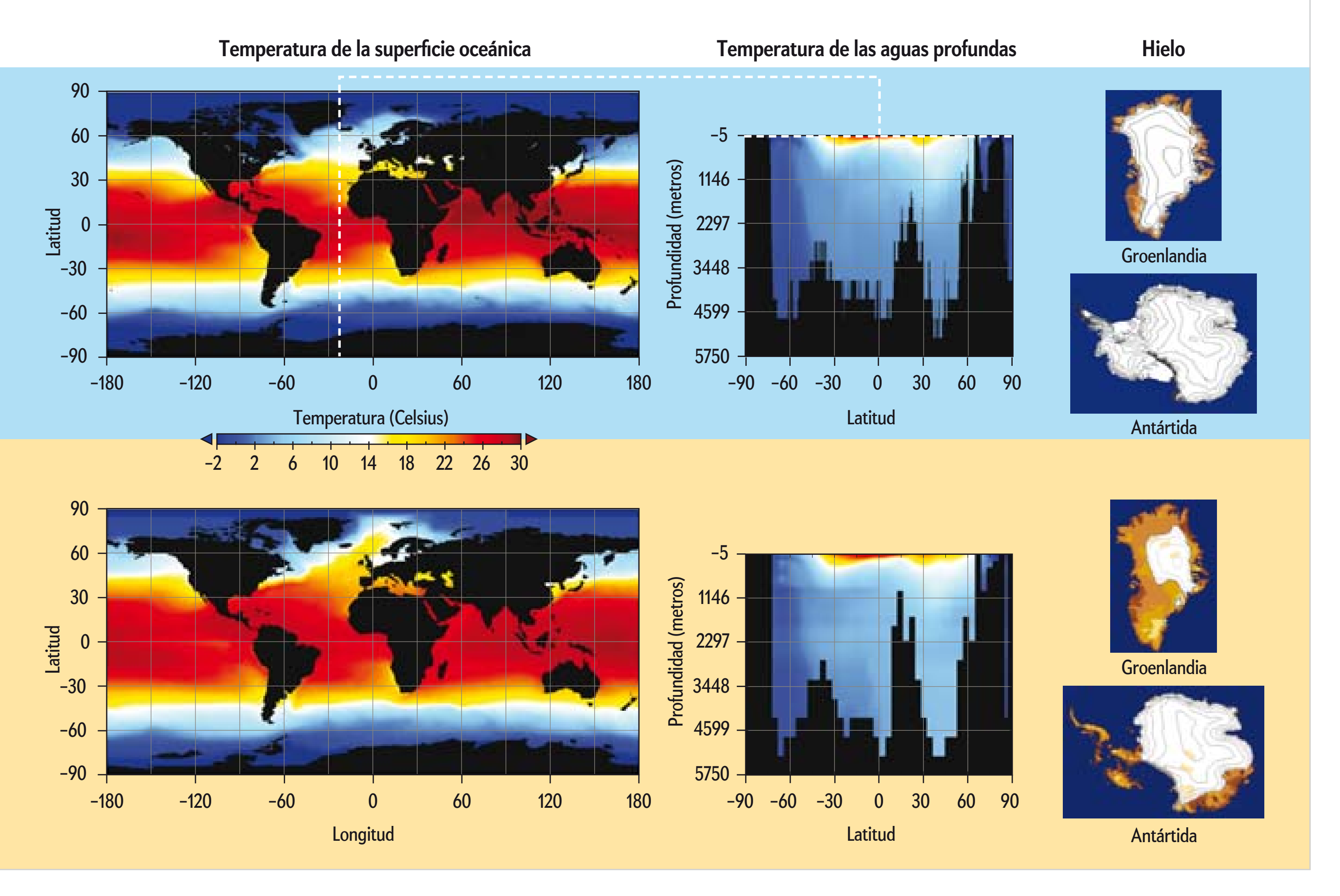
Existen dos fuentes de incertidumbre asociadas a las predicciones climáticas: la precisión de las condiciones de contorno y la capacidad del modelo para simular un sistema climático global de enorme complejidad. En nuestro caso, las condiciones de contorno corresponden a los datos de la reconstrucción del PRISM, los cuales se emplean para poner a punto las simulaciones. A fin de minimizar la incertidumbre de los datos del PRISM relativos a la temperatura de la superficie oceánica, se utilizan varios indicadores: las asociaciones fósiles, las alquenonas y las proporciones de magnesio y calcio. Este método reduce el error frente a las estimaciones basadas en un solo indicador; además, emplear múltiples indicadores permite calcular la temperatura en mayor número de zonas. Por ejemplo, los estudios sobre foraminíferos planctónicos no sirven para estimar las temperaturas en las latitudes altas, ya que allí escasean y, en las asociaciones, suele predominar una sola especie, a menudo extinguida. Por otro lado, las técnicas basadas en las alquenonas no son aplicables en zonas cálidas tropicales, puesto que no registran las temperaturas por encima de los 28 grados.

Las incertidumbres de las simulaciones pueden tratarse utilizando un conjunto de modelos. En el método de «predicción por conjuntos», o de comparación entre modelos, varios modelos climáticos ejecutan simulaciones idénticas con las mismas condiciones de contorno y en los mismos escenarios de emisión. Así fue como se realizaron las proyecciones del IPCC mencionadas al principio de este artículo.

En diciembre de 2011, el Grupo de Trabajo I presentará el primer borrador de su contribución al Quinto Informe de Evaluación del IPCC. En estos momentos, 17 grupos de modelización climática utilizan la reconstrucción del PRISM para fijar las mismas condiciones de contorno y ejecutar simulaciones idénticas. Sus modelos integran el Proyecto de Intercompara-

AMERICAN SCIENTIST

En las latitudes altas, las temperaturas eran más elevadas que en la actualidad. Este calentamiento se intensificó debido a la interacción entre el hielo y el agua oceánica. En el océano Ártico se adentraban periódicamente masas de agua templada —unos 18 grados Celsius más caliente que a mediados del siglo XX en la misma región—, lo que implicaba que las masas de hielo desaparecían durante algunas épocas del año. Las aguas profundas del Atlántico Norte, que se forman cuando el agua fría y densa se hunde al norte de Islandia y se desplaza hacia el sur, eran más cálidas durante el Plioceno. El volumen de las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida occidental era considerablemente menor, al igual que la capa de hielo de la Antártida oriental. El deshielo de los casquetes glaciares en aquella época se ha asociado con un nivel del mar unos 22 metros por encima del actual.



ción de Modelos del Plioceno (PlioMIP), fundado por Dowsett; Mark Chandler, de la Universidad de Columbia y del Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA, y Alan Haywood, de la Universidad de Leeds. El abanico de resultados que arrojen unos modelos y otros permitirá identificar la variabilidad intrínseca a dichos modelos y eliminarla de la medida de incertidumbre. El resto de las variaciones constituirán las barras de error que cuantifiquen la incertidumbre de las simulaciones climáticas, tanto las del pasado como las del futuro.

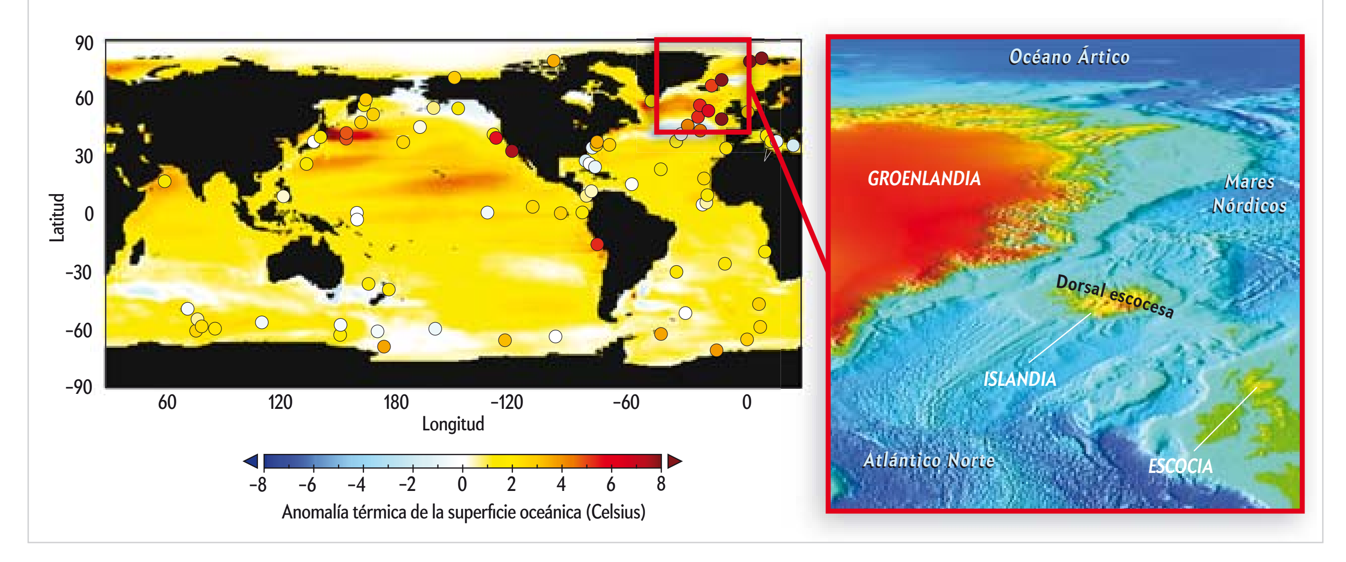
Otro método de acotar la incertidumbre consiste en ejecutar, con un solo modelo, un conjunto de simulaciones en las que se va modificando ligeramente una magnitud física cuyo valor no conocemos por completo. Al final, se compara el conjunto de resultados con la reconstrucción del PRISM. La simulación que mejor concuerda es la que se emplea para fijar el valor de la variable.

James Pope, estudiante de doctorado de la Universidad de Leeds, emplea el método anterior para calcular la incertidumbre de las proyecciones sobre el Plioceno realizadas con el modelo HadCM3 y con las condiciones de contorno del PRISM. Se trata de la primera ocasión en la que el método se aplica al caso de un planeta más cálido y con niveles altos de dióxido de carbono. La variable escogida para las primeras simulaciones ha sido la sensibilidad climática. Esta cantidad se define como la respuesta de la media anual de la temperatura global ante una duplicación de la concentración del CO_2 atmosférico. La indeterminación en el valor de esta magnitud constituye una de las principales fuentes de incertidumbre en las simulaciones climáticas.

En una serie de simulaciones sobre el Plioceno, un estudio piloto de Pope consideró un intervalo de valores para la sensibilidad climática entre 2,1 grados Celsius (baja) y 7,1 grados (alta). La simulación con una sensibilidad climática elevada reprodujo mejor las temperaturas de la superficie oceánica del PRISM. Sin embargo, la simulación de control, sin incluir perturbaciones, reflejó mejor la distribución de la vegetación. Los resultados son prometedores e indican que con un amplio conjunto de simulaciones podría obtenerse un mejor ajuste de los datos.

Reconstrucciones frente a modelos

Aquí se representan las anomalías térmicas de la superficie oceánica del Plioceno medio según los datos del proyecto PRISM (*puntos sobre el planisferio*) frente a los valores obtenidos por el Modelo Acoplado del Centro Hadley (HadCM3, *fondo de color*). Las temperaturas estimadas por el PRISM en las proximidades de la dorsal escocesa, en el Atlántico Norte, superaban a las temperaturas proyectadas por el modelo. La discrepancia dio pie a un estudio detallado sobre la producción de agua profunda en la zona. Al final, se esclareció la manera en que los cambios de altura de la dorsal escocesa influiría sobre las temperaturas del agua de la región.



MÁXIMO PROVECHO

El clima del Plioceno aparece, pues, como el análogo natural más parecido al clima que se espera para finales de siglo, por lo que su estudio resulta de gran valor para aumentar la fiabilidad de nuestros modelos computacionales sobre el clima. Sin embargo, cabe recordar que existen diferencias en algunos aspectos fundamentales. Por un lado, la Tierra pliocena todavía no había sufrido los ciclos glaciales e interglaciales que han caracterizado los últimos millones de años. En consecuencia, el Plioceno no se encontraba en una época tendente hacia un clima más cálido, como la que vivimos hoy, sino que fue el período precedente a un prolongado enfriamiento que culminó con las glaciaciones.

Otra diferencia, más significativa, reside en que el Plioceno se caracterizó por una estabilidad climática nada similar al estado de desequilibrio actual. Entonces, las concentraciones de dióxido de carbono atmosférico se mantuvieron relativamente estables y el clima pudo adaptarse a ellas. Las emisiones ocurrieron de manera gradual y se debieron a procesos naturales, como la actividad volcánica o la descomposición de materia orgánica. Hoy, la situación es bien distinta: la quema de combustibles fósiles y la deforestación conllevan emisiones mucho más rápidas. El clima actual se encuentra todavía en proceso de reajuste y tardará un tiempo alcanzar el equilibrio.

Por otra parte, hemos detectado un elemento geológico que, aunque condicionó el clima cálido del Plioceno, actúa en escalas de tiempo muy dilatadas: la variación de la altura topográfica de la dorsal escocesa. El fenómeno, que obedece a los movimientos de magma bajo Islandia, afectó probablemente al transporte de agua caliente superficial hacia el océano Ártico. Las cálidas temperaturas que experimentaron estas latitudes fueron producto de una serie de cambios que se sucedieron en escalas de tiempo del orden de cientos de miles o incluso de millones de años. El clima actual no responderá a este condicionante climático en un futuro próximo.

A pesar de que el Plioceno no supuso un análogo exacto de nuestro futuro cercano, su estudio nos ayudará a elaborar previsiones más precisas. Durante el Plioceno se produjo una elevación del nivel del mar y un desplazamiento hacia los polos de las temperaturas y de las especies vegetales tropicales. Es posible que se observen los mismos fenómenos conforme el clima actual se vaya volviendo más cálido. Probablemente, las latitudes más altas se calentarán en mayor medida que las bajas y las capas de hielo se fundirán. Cuánto, no lo sabemos. Y puede que las pequeñas variaciones en la circulación oceánica ejerzan un gran efecto sobre fenómenos regionales, como los cambios estacionales de la profundidad de la termoclina (la capa de agua donde la temperatura disminuye bruscamente) o el ascenso de aguas profundas hacia la superficie. A menudo oímos que el actualismo nos enseña que el presente es la clave para entender el pasado. Pero no deberíamos pasar por alto otra consecuencia igual de cierta: que el pasado también resulta clave para entender el futuro.

PARA SABER MÁS

Modelling Pliocene warmth: Contributions of atmosphere, oceans and cryosphere. A. M. Haywood y P. J. Valdes en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 218, pág. 363, 2004.

Mid-Pliocene equatorial Pacific sea surface temperature reconstruction: A multi-proxy perspective. H. J. Dowsett y M. M. Robinson en *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 367, pág. 109, 2009.

Pliocene model intercomparison project (PlioMIP): Experimental design and boundary conditions (Experiment 1). A. M. Haywood et al. en *Geoscientific Model Development*, vol. 3, pág. 116, 2010.

Bathymetric controls on Pliocene Arctic sea-surface temperature and deepwater production. M. M. Robinson et al. en *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 309, n.os 1-2, pág. 92, 2011.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. **ASTRONOMÍA**
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. **BIOLOGÍA**
El origen de la vida, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. **COMPUTACION**
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. **FÍSICA**
Fronteras de la física, El tiempo, Fenómenos cuánticos
5. **CIENCIAS DE LA TIERRA**
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. **GRANDES CIENTÍFICOS**
Einstein, Newton, Darwin
7. **MEDICINA**
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. **CIENCIAS AMBIENTALES**
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. **NEUROCIENCIAS**
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. **LUZ Y TÉCNICA**
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorre más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo
T-52: El origen de la vida
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 7,00€



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,00€





GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

Por cada tramo o fracción de 5 productos

España: 2,80€ Otros países: 14,00€

Oferta Colección BSA

España: 7,00€ Otros países: 60,00€

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web: www.investigacionyciencia.es



Rachel Caspari es profesora de antropología en la Universidad Central de Michigan. Su investigación se centra en los neandertales, en el origen de los humanos actuales y en la evolución de la longevidad.



EVOLUCIÓN HUMANA

El origen de la longevidad

En los ancianos puede radicar el éxito de nuestra especie

Rachel Caspari

VIKTOR DEAK

EN SÍNTESIS

Hoy las personas suelen vivir lo bastante como para llegar a abuelos, pero no siempre fue así. Estudios recientes de dientes fósiles indican que los abuelos escaseaban en las poblaciones antiguas, como los australopitecinos y neandertales. Se hicieron abundantes hace unos 30.000 años, según demuestran los restos de los primeros europeos modernos.

El ascenso del número de ancianos habría contribuido a la expansión de nuevos tipos de herramientas y formas de arte que se produjo en Europa por aquella época. También explicaría por qué los humanos modernos tuvieron éxito y lograron desplazar a otros grupos arcaicos, como los neandertales.

En el verano de 1963, cuando tenía seis años de edad, mi familia viajó desde Filadelfia a Los Ángeles para visitar a la familia de mi madre. Ya conocía bien a mi abuela porque había ayudado a mi madre en el cuidado de mis dos hermanos gemelos, 18 meses más jóvenes que yo, y también de mí. Cuando no estaba con nosotros, mi abuela vivía con su madre, a la que vi por primera vez ese verano. Mi familia es bastante longeva. Mi abuela nació en 1895, y mi bisabuela, en 1860; ambas vivieron casi 100 años. Estuvimos con las dos matriarcas durante varias semanas. A través de sus historias, conocí mis raíces y mi posición en la red de relaciones sociales que abarca cuatro generaciones. Sus recuerdos me ayudaron a entender el modo de vida al final de la Guerra Civil y en la etapa de reconstrucción, y supe cómo mis antepasados perseveraron y afrontaron las dificultades.

Mi historia no es única. Los ancianos desempeñan un papel fundamental en las sociedades humanas de todo el planeta. Transmiten conocimientos y proporcionan ayuda social y económica a las familias de sus hijos y de otros parientes. En la época actual, la mayoría de las personas viven lo suficiente como para convertirse en abuelos. Pero ello no siempre fue así. ¿Cuándo aumentó el número de abuelos? ¿Cómo influyó su presencia en la evolución humana?

Las investigaciones que he realizado junto a otros nos llevan a pensar que los individuos de mayor edad no se hicieron abundantes hasta un momento reciente de nuestra prehistoria. El cambio se produjo cuando aparecieron los comportamientos típicamente modernos, entre ellos, la dependencia de un sistema de comunicación simbólica que permite el lenguaje y las manifestaciones artísticas. Estos descubrimientos indican que la prolongación de la vida hasta una edad avanzada ejerció una gran influencia en el tamaño de la población, en las interacciones sociales y en la genética de los primeros grupos de humanos modernos. También explica por qué estos grupos tuvieron más éxito que otros humanos arcaicos, como los neandertales.

VIVE RÁPIDO, MUERE JOVEN

El primer paso para conocer el momento en que los abuelos se convirtieron en una parte importante de la sociedad consiste en establecer la composición de las poblaciones del pasado: ¿cuál era el porcentaje de niños, de adultos en edad reproductora y de padres de estos adultos? Reconstruir la demografía de poblaciones antiguas resulta complicado. Sobre todo, porque en el registro fósil nunca se conserva la población en su totalidad. Al contrario, los paleontólogos hallamos solo fragmentos de algunos individuos. Por otro lado, los humanos primitivos no crecían necesariamente con el mismo ritmo que el de las poblaciones actuales. De hecho, existen diferencias en el ritmo de crecimiento entre poblaciones contemporáneas. Pero en unos pocos yacimientos se ha recuperado, de un mismo nivel arqueológico, un número suficiente de fósiles humanos para poder determinar la edad de fallecimiento de los individuos, información esencial para deducir la composición de un grupo prehistórico.

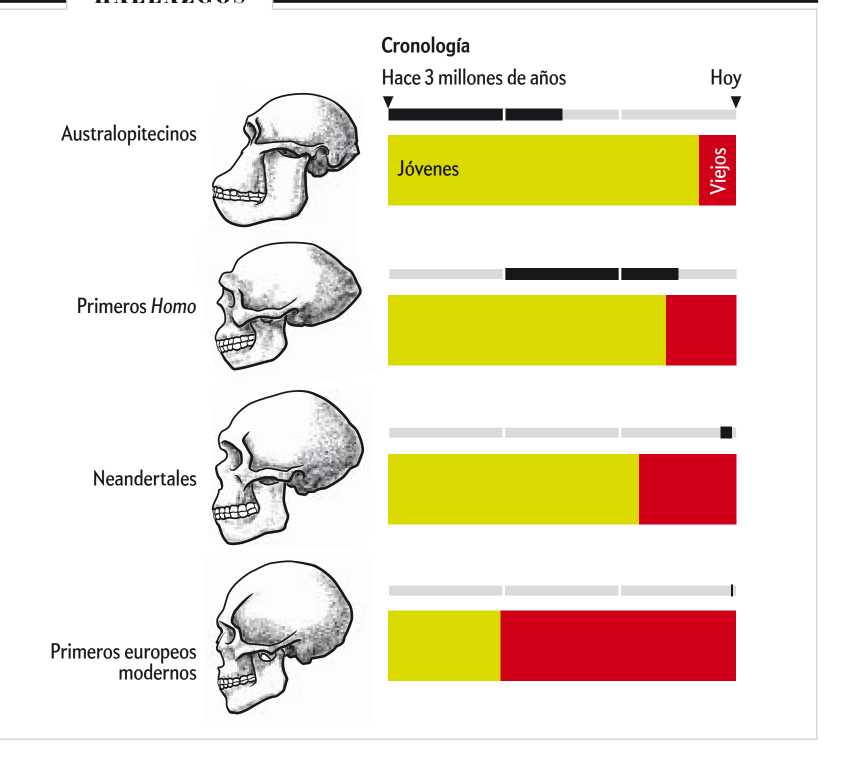
Uno de estos yacimientos corresponde a un abrigo rocoso cerca de la población de Krapina (Croacia), a unos 40 kilómetros al noroeste de Zagreb. Hace más de un siglo que el paleontólogo Dragutin Gorjanović-Kramberger excavó y recuperó los restos fragmentarios de unos 70 neandertales. La mayoría de ellos procedía de un nivel datado en 130.000 años de antigüedad. Varios indicios indicaban que los huesos de Krapina procedían de una única población de neandertales: los numerosos restos próximos entre sí, la rápida acumulación aparente de sedimento en el yacimiento y el hecho de que algunos restos compartieran rasgos genéticamente distintivos. Como resulta habitual en el registro fósil, la parte mejor conservada correspondía a los dientes, ya que su composición mineral los hace más resistentes a la degradación. Además, constituyen uno de los mejores elementos anatómicos para determinar la edad de fallecimiento, a partir del análisis de la superficie de desgaste y de los cambios producidos en su estructura interna durante el crecimiento.

En 1979, antes de empezar mis estudios sobre la evolución de los abuelos, Milford H. Wolpoff, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, publicó un artículo en el que establecía la edad de fallecimiento de los neandertales de Krapina a partir de los restos dentales. Los molares erupcionan de forma secuencial. Wolpoff utilizó una de las secuencias de dentición más rápidas en los humanos actuales para atribuir la edad en que murieron los homínidos. Estimó que el primer, segundo y tercer molar habían erupcionado hacia los seis, doce y quince años de edad, respectivamente. El desgaste se va acumulando de forma constante a lo largo de la vida de un individuo. Así, cuando el segundo molar emerge, el primer molar ya tiene seis años de desgaste, y cuando surge el tercero, el segundo ha acumulado tres años de desgaste.

Si retrocedemos más en el tiempo, podemos deducir que un primer molar con 15 años de desgaste correspondió a un neandertal que vivió hasta los 21 años de edad, que un segundo molar con 15 años de desgaste perteneció a un individuo de 27 años y que un tercer molar con 15 años de desgaste fue de un individuo de 30 años. (Estas estimaciones poseen un margen de error de un año.) Este método para establecer la edad de la muerte a partir del desgaste representa una adaptación de la técnica desarrollada por el especialista en dentición A. E. W. Miles en 1963. Funciona mejor si se dispone de un gran número de muestras de individuos jóvenes, tal y como sucede en Krapina. El méto-

Cada vez más ancianos

El análisis de los dientes fósiles de cientos de individuos de los últimos tres millones de años indica que vivir el tiempo suficiente para llegar a ser abuelo constituye un fenómeno reciente en la evolución humana. La autora estableció la proporción entre los adultos de edad avanzada (potencialmente abuelos) y los adultos jóvenes en cuatro grupos humanos: australopitecinos, primeros miembros del género *Homo*, neandertales y primeros humanos modernos de Europa. Descubrió que la relación había aumentado poco durante toda la evolución humana hasta hace unos 30.000 años, cuando la proporción se disparó.



do pierde eficacia cuando se aplica a ancianos, ya que su corona dental está demasiado desgastada y en algunos casos ha desaparecido por completo.

El trabajo de Wolpoff indicaba que los neandertales de Krapina perecieron jóvenes. En 2005, unos años después de iniciar mis investigaciones sobre la evolución de la longevidad, decidí volver a estudiar esta muestra mediante una técnica más moderna. Quería asegurarme de que no habíamos infraestimado el número de individuos viejos como resultado de las limitaciones del método de desgaste. Junto a Jakov Radovčić, del Museo Croata de Historia Natural de Zagreb, Steve A. Goldstein, Jeffrey A. Meganck y Dana L. Begun, todos ellos estudiantes de doctorado de la Universidad Central de Michigan, aplicamos un método de análisis no destructivo, la microtomografía computerizada (μTC), para reevaluar la edad a la que murieron los homínidos de Krapina. En concreto, medimos el grado de desarrollo de cierto tejido dental, la dentina secundaria. El volumen de este tejido aumenta con el tiempo, por lo que es posible conocer la edad de fallecimiento de un individuo cuya corona dental está tan erosionada que su desgaste ya no constituye un buen indicador.

Nuestras primeras observaciones, complementadas con los escáneres que proporcionó el Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva de Leipzig, corroboraron los resultados de Wolpoff y validaron el método de asignación de edad mediante el desgaste. Los homínidos de Krapina exhibían un alto índice de mortalidad y ninguno sobrevivió más allá de los 30 años. (Ello no significa que los neandertales no pudieran sobrepasar esa edad, ya que en otros yacimientos se han descubierto restos de individuos fallecidos a los 40 años).

Para los estándares actuales, el patrón de mortalidad de Krapina es inimaginable. De hecho, hoy la mayoría de las personas de 30 años se hallan en el mejor momento de su vida. Y, en un pasado reciente, los miembros de pueblos de cazadores-recolectores vivían más allá de los 30 años. Otro de los pocos yacimientos con numerosos individuos fósiles, la Sima de los Huesos en Atapuerca (Burgos), de unos 600.000 años de antigüedad, muestra un patrón similar. Los restos indican una gran mortalidad infantil y de adultos jóvenes. Ninguno de ellos superó los 35 años y muy pocos alcanzaron esta edad. Es posible que algún tipo de evento catastrófico o las condiciones de formación de estos yacimientos hayan dado lugar a una escasa representación de los individuos de mayor edad. Pero la revisión que hemos realizado del registro fósil, no solo de los yacimientos inusualmente ricos como los mencionados, sino también de otros con menos individuos, nos indica que morir joven era la norma y no la excepción. Parafraseando las palabras atribuidas al filósofo Thomas Hobbes, la vida durante la prehistoria era realmente desagradable, dura y corta.

LA APARICIÓN DE LOS ABUELOS

La aplicación de la μTC ofrece la posibilidad de calcular con mayor precisión la edad de los individuos viejos en las poblaciones fósiles. Pero hace algunos años, antes de emplear esta técnica novedosa, junto a Sang-Hee Lee, de la Universidad de California en Riverside, habíamos empezado a investigar los cambios en la longevidad a lo largo de la evolución humana. En aquel momento utilizamos la mejor aproximación disponible para su estudio: el desgaste dental.

Pero nos encontramos con una dificultad desalentadora. La mayoría de los fósiles humanos no proceden de yacimientos como el de Krapina, cuyos numerosos individuos pueden considerarse una muestra representativa de la población. Cuanto menor es la cantidad de individuos contemporáneos recuperados de un yacimiento, más difícil resulta determinar la edad de fallecimiento de la población, ya que las muestras pequeñas dan lugar a muchas incertidumbres de tipo estadístico.

Abordamos entonces la cuestión de otro modo. En vez de preguntarnos cuánto tiempo vivían los individuos, investigamos cuántos de ellos habían llegado a ser viejos. Es decir, en lu-

PORTIA SLOAN ROLLINGS (*ilustración*); JEN CHRISTIANSEN (*gráfica*); FUENTE: «OLDER AGE BECOMES COMMON LATE IN HUMAN EVOLUTION», POR RACHEL CASPARI Y SANG-HEE LEE, EN *PNAS*, VOL. 101, N.º 30; 27 DE JULIO DE 2004

gar de fijarnos en la edad absoluta, examinamos la proporción de adultos que había superado una edad a la que ya podrían ser abuelos. Nuestro objetivo consistía en evaluar los cambios evolutivos que se habían producido en la relación entre adultos jóvenes y adultos viejos mediante el índice OY (del inglés, *Old/Young*). Entre los primates, incluidos los humanos hasta época reciente, el tercer molar erupciona cuando el individuo ha alcanzado la edad adulta y ha llegado a la etapa reproductora. A partir de datos de neandertales y de poblaciones de cazadores-recolectores contemporáneos, inferimos que, en los humanos fósiles, el tercer molar emergía hacía los 15 años y que a esa edad empezaban a criar. Doblamos por tanto esa edad para considerar el inicio de una posible situación de abuelo. Hoy en día, este hecho se produce en algunas mujeres que han tenido hijos a los 15 años y que se convierten en abuelas cuando su descendencia se reproduce a la misma edad.

De esta forma, en nuestro estudio, definimos los adultos viejos como aquellos de más de 30 años, edad a la que ya podían ser abuelos. La ventaja del índice OY estriba en que, aunque la edad de maduración sexual varíe y se sitúe en los 10, 15 o 20 años, la proporción de individuos jóvenes o viejos no se verá afectada, ya que a su vez cambiará la edad en que se podrán convertir en abuelos. Como nuestra intención era situar cada uno de los fósiles en esas dos amplias categorías, pudimos incluir numerosas muestras pequeñas de fósiles sin preocuparnos de las imprecisiones sobre su edad absoluta.

Hemos calculado el índice OY en cuatro grandes conjuntos fósiles que reúnen un total de 768 individuos y que abarcan un período de tres millones de años. El primer grupo incluye a los últimos australopitecinos, los parientes primitivos de Lucy que vivieron en África oriental y meridional hace entre 3 y 1,5 millones de años. El segundo grupo está formado por los primeros miembros de nuestro género *Homo*; proceden de diferentes continentes y datan de entre 2 millones y 500.000 años. El tercer grupo son los neandertales europeos de entre 130.000 y 30.000 años de antigüedad. Y el último está constituido por los humanos modernos europeos del Paleolítico superior, que vivieron hace entre 30.000 y 20.000 años y que dejaron tras de sí indicios de una cultura material muy compleja.

Aunque esperábamos hallar un aumento de la longevidad a lo largo del tiempo, no imaginábamos que nuestro estudio arrojaría resultados tan sorprendentes. Descubrimos que la longevidad se había incrementado muy ligeramente en las primeras muestras, pero que el índice OY se multiplicaba por cinco al llegar a los humanos modernos del Paleolítico superior. Es decir, por cada 10 neandertales adultos que habían fallecido entre los 15 y los 30 años, solo 4 habían superado la barrera de los 30 años. En cambio, en el Paleolítico superior de Europa, por cada 10 adultos jóvenes había unos 20 abuelos potenciales. Para descartar la posibilidad de que ese alto porcentaje de adultos viejos se debiera a los numerosos enterramientos que se realizaban en el Paleolítico superior, rehicimos la muestra de ese período incluyendo tan solo los restos de individuos no enterrados. Obtuvimos los mismos resultados. La conclusión era inapelable: la supervivencia de los adultos aumentó en una época reciente de la evolución humana.

¿RAZONES BIOLÓGICAS O CULTURALES?

Tras determinar que el número potencial de abuelos se elevó en algún momento de la evolución de los humanos anatómicamente modernos, nos planteamos una segunda pregunta: ¿Cómo se originó ese cambio? Había dos posibilidades. O bien la longevidad constituía uno de los numerosos rasgos controlados por genes que distinguía, desde un punto de vista biológico, a los humanos anatómicamente modernos de sus antepasados o, en cambio, la longevidad no se hallaba vinculada a la aparición de la anatomía moderna y era el resultado de cambios en el comportamiento. Los primeros humanos anatómicamente modernos no aparecen en la escena evolutiva asociados a manifestaciones artísticas y al empleo de utensilios complejos, ambas conductas propias del Paleolítico superior. Su origen se sitúa más de 100.000 años antes de los europeos del Paleolítico supe-

CONSECUENCIAS

Desarrollo cultural

El marcado ascenso de la supervivencia de los adultos iniciado hace 30.000 años en Europa habría impulsado el cambio cultural desde una tecnología simple, en el Paleolítico medio, hasta una tecnología mucho más compleja y dotada de manifestaciones artísticas, en el Paleolítico superior. Abajo se muestran algunos de los objetos más representativos de ambas tradiciones culturales.



MUSEO DE HISTORIA NATURAL, LONDRES (*punta de sílex y raedera*); DAVID L. BRILL (*raedera doble*); RANDALL WHITE, UNIVERSIDAD DE NUEVA YORK (*canino de lobo*); GETTY IMAGES (*flauta*); DIDIER DESCOUENS, MUSEO DE TOULOUSE, FRANCIA (*buril*); DANITA DELIMONT *Getty Images* (*Venus*)

rior y, durante mucho tiempo, los primeros humanos modernos y sus contemporáneos, los neandertales, utilizaron la misma tecnología simple del Paleolítico medio. (Aunque en ambos grupos se hayan descubierto comportamientos simbólicos y utensilios complejos, las pruebas son efímeras en comparación con el uso sistemático y constante que caracteriza el período posterior.) Nuestro estudio indicaba que el incremento en el número de ancianos era único entre los humanos anatómicamente modernos. Pero no podíamos decantarnos por la explicación biológica o la cultural, ya que los humanos modernos que examinábamos eran a la vez anatómica y culturalmente modernos. ¿Podríamos determinar la longevidad de los primeros humanos que ya eran modernos a nivel anatómico pero todavía no a nivel tecnológico?

Para responder a esta pregunta, analizamos los humanos del Paleolítico medio de diferentes yacimientos de Asia occidental, datados entre 110.000 años y 40.000 años de antigüedad. Nuestra muestra incluía restos de neandertales y humanos modernos, todos ellos asociados al mismo tipo de objetos simples. Esa aproximación nos permitió comparar el índice OY de dos grupos (que algunos científicos consideran dos especies distintas) que vivieron en la misma región y poseían la misma complejidad cultural. Descubrimos que los neandertales y los humanos modernos del Próximo Oriente exhibían el mismo índice OY. Por tanto, descartamos la posibilidad de que el cambio biológico fuese el responsable del incremento en la longevidad observada en los humanos modernos del Paleolítico superior. Ambos grupos presentaban casi el mismo número de adultos jóvenes y adultos viejos, y su índice OY se situaba entre el de los neandertales y el de los humanos modernos de Europa.

Comparado con los neandertales europeos, una mayor proporción de neandertales asiáticos (y de humanos modernos) vivieron lo bastante como para ser abuelos. El dato no sorprende, ya que en las condiciones más templadas de Asia occidental la supervivencia habría resultado más fácil que en el duro entorno de la Europa glacial. Pero, si bien el clima más suave del Próximo Oriente habría contribuido a aumentar la longevidad de los grupos del Paleolítico medio en esa zona, la longevidad de los europeos del Paleolítico superior creció de forma extraordinaria: a pesar de las difíciles circunstancias, los europeos de esa época presentaban un índice OY el doble que el de los humanos modernos del Paleolítico medio.

LA IMPORTANCIA DE LA MADUREZ

Desconocemos las características culturales iniciales que permitieron alargar la vida de muchos europeos del Paleolítico superior. Pero no hay ninguna duda de que el incremento en la longevidad tuvo efectos de gran alcance. Según los trabajos de Kristen Hawkes, de la Universidad de Utah, Hillard Kaplan, de la Universidad de Nuevo México, y otros autores, en diferentes grupos actuales de cazadores-recolectores, los abuelos contribuyen habitualmente a los recursos económicos y sociales de sus descendientes. Permiten aumentar el número de descendientes de sus propios hijos, así como la supervivencia de sus nietos. Los abuelos también refuerzan los complejos vínculos de las redes sociales, tal y como hizo mi abuela al contarme historias sobre mis antepasados que me acercaban a familiares de mi propia generación. Este tipo de información constituye la base de la organización social humana.

Los mayores también transmiten otros conocimientos culturales relativos al ambiente (identificar las plantas peligrosas o un lugar con agua en épocas de sequía) o a la tecnología (tejer una cesta o tallar un cuchillo de piedra). Los estudios realizados por Pontus Strimling, de la Universidad de Estocolmo, demuestran que la repetición constituye una estrategia esencial en la transmisión de normas y tradiciones de una cultura. Las familias compuestas de varias generaciones cuentan con más miembros que recalcan las lecciones importantes. De esta forma, la longevidad pudo impulsar la acumulación y transferencia de información entre generaciones. Se formaron así los complejos sistemas de relaciones de parentesco y de redes sociales que nos permiten ofrecer y recibir ayuda en momentos de necesidad.

Una mayor longevidad habría hecho aumentar a su vez el tamaño de la población, al sumarse un grupo de edad todavía con capacidad reproductora. El crecimiento de la población conlleva asimismo nuevos comportamientos. En 2009, el grupo de Adam Powell, del Colegio Universitario de Londres, publicó un estudio en *Science* donde demostraba la importancia de la densidad de población en el mantenimiento de la complejidad cultural. Estos autores y otros indican que una población más numerosa promovería el desarrollo de redes de intercambio, sistemas complejos de cooperación y la aparición de elementos de identidad individual y de grupo (adornos, pinturas corporales, etcétera). Bajo esta perspectiva, algunos de los rasgos típicos del Paleolítico superior, como el uso sistemático de símbolos o la incorporación de materiales exóticos para fabricar objetos, habrían surgido gracias al aumento de población.

El crecimiento de la población habría tenido otras consecuencias en nuestros antepasados: la aceleración de la evolución. Según John Hawks, de la Universidad de Wisconsin-Madison, un mayor número de personas significa más mutaciones y oportunidades de que las mutaciones ventajosas se extiendan a medida que los miembros de una población se reproducen. Esta tendencia habría revestido mayor importancia en los humanos más recientes que durante el Paleolítico superior, ya que la población se incrementó drásticamente tras la domesticación de las plantas hace 10.000 años. Gregory Cochran y Henry Harpending, de la Universidad de Utah, en su libro publicado en 2009, *The 10.000 year explosion*, describen numerosas variantes genéticas (responsables del color de la piel o de la capacidad de digerir leche de vaca) que surgieron y se expandieron en los últimos 10.000 años gracias al gran número de individuos reproductores.

La relación entre la longevidad y la aparición de complejas tradiciones culturales, iniciada en el Paleolítico superior, constituyó sin duda un proceso que se retroalimentaba. Aunque en un principio la longevidad debió de aparecer como consecuencia de algún cambio cultural, después se convertiría en un rasgo imprescindible para desarrollar la exclusiva complejidad conductual que señala la modernidad. A su vez, esas innovaciones hicieron muy importante la supervivencia de las personas de edad avanzada, conllevó la expansión de la población y ejerció una gran influencia en la cultura y la genética de nuestros antepasados. Que se hicieron cada vez mayores y más sabios.

PARA SABER MÁS

Older age becomes common late in human evolution. Rachel Caspari y Sang-Hee Lee en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 101, n.º 30, págs. 10.895-10.900, 27 de julio de 2004.

Is human longevity a consequence of cultural change or modern human biology? Rachel Caspari y Sang-Hee Lee en *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 129, págs. 512-517, abril de 2006.

Claudi Mans es catedrático emérito de ingeniería química en la Universidad de Barcelona y coordinador del Campus de la Alimentación de Torribera, de la misma universidad.

Pere Castells, químico orgánico, es el responsable del departamento de investigación gastronómica y ciencia de la Fundación Alicia, y autor de nuestra sección *Ciencia y Gastronomía*.



QUÍMICA

La nueva cocina científica

De la incertidumbre a la predictibilidad culinaria mediante la ciencia: el gran paso de la cocina del siglo XXI

Claudi Mans y Pere Castells

En el Año Internacional de la Química merece la pena resaltar la contribución de esta ciencia a un ámbito tan aparentemente alejado de su actividad habitual como la cocina. Para muchos usuarios, la alimentación y los alimentos tienen como valor fundamental mantenerse alejados de la «química», en el sentido de evitar los aditivos, sobre todo los sintéticos. Pero la relación entre la química y la cocina va mucho más allá del uso de sustancias en alimentos preparados.

A lo largo de los últimos años se ha producido una verdadera revolución en la cocina de numerosos restaurantes, una revolución basada en la ciencia. Se han modificado metodologías clásicas mediante la introducción de aspectos más propios de un laboratorio de química: precisión en la medición de masas, volúmenes, temperaturas y tiempos, control de parámetros de operación, búsqueda y utilización de nuevos productos e introducción de nuevas técnicas operativas. Todo ello, junto con la escrupulosa redacción de las recetas en forma de fichas técnicas exhaustivas, busca la reproducibilidad de las preparaciones culinarias y su difusión a la sociedad en la forma exacta.

La implicación de científicos en cuestiones culinarias empezó hace largo tiempo. Pensemos en el invento del físico estadounidense Benjamin Thomson, futuro conde de Rumford, quien en 1804 propuso la tortilla noruega, denominada también pastel de Alaska o tortilla sorpresa, como ejemplo del uso de una espuma a modo de aislante térmico. Dicha preparación consiste en un helado sobre un bizcocho, envuelto en merengue y todo ello gratinado: caliente en la superficie, helado en el interior. Pero suele fijarse el inicio de la luna de miel entre científicos y cocineros en la colaboración entre Nicholas Kurti, de la Universidad de Oxford, y Elizabeth Cawdry Thomas, profesora de cocina, en un programa televisivo que la BBC viene emitiendo desde 1969.

Unos años más tarde, en 1992, con la participación de Kurti, Harold McGee, escritor especializado en gastronomía, y Hervé This, del Instituto Nacional de Investigación Agronómica francés, se celebra en el Centro Ettore Majorana en Erice, Sicilia, el primer Taller internacional sobre gastronomía molecular y física. El evento, centrado en la comprensión de los fenómenos físicos y químicos involucrados en el hecho culinario, se celebró cada año hasta 2004. De ahí surgió el movimiento Gastronomía Molecular, cuyo objetivo último es aplicar el conocimiento científico a las preparaciones gastronómicas con el fin de llegar a la perfección en su preparación. Esta corriente inundó numerosas cocinas al final del siglo XX y principios del presente siglo, pero la avalancha de optimismo que generó topó con ciertas limitaciones, debidas a la ausencia de diálogo entre científicos y cocineros, que frenaron su progreso.

No puede imaginarse la cocina como un laboratorio que trabaja con sustancias de composición conocida, sino más bien como uno que trabaja con materiales compuestos de gran complejidad. En la cocina se hallan especies químicas casi puras, como el agua (H_2O), la sal (cloruro de sodio, NaCl), el azúcar refinado (sacarosa, $C_{12}H_{22}O_{11}$) o el bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$). Encontramos también mezclas simples como los aceites y grasas (mezclas de triglicéridos), el vino y el vinagre (disoluciones acuosas de etanol, CH_3-CH_2OH, y ácido acético, CH_3COOH, con otros muchos componentes minoritarios). Pero otras sustancias en apariencia sencillas, aún sin formar parte de estructuras anatómicas o celulares, entrañan gran complejidad. Nos referimos, sobre todo, a sistemas dispersos o dispersiones coloidales comestibles. Pensemos en la leche, una emulsión formada por

Criogenización: Al poner aceite de oliva en contacto con un medio a temperaturas ultrabajas se obtienen formas y texturas que guardan semejanza con las palomitas de maíz.



DANI GARCÍA

EN SÍNTESIS

La gastronomía molecular ahonda en la comprensión de los fenómenos fisicoquímicos implicados en la actividad culinaria.

Esta nueva disciplina ha propiciado una fructífera colaboración entre cocineros y científicos interesados en la cocina, que ha cosechado avances notables en el panorama gastronómico del siglo XXI.

Diversas ideas y procedimientos derivados de la investigación gastronómico-científica se están aplicando a la mejora de la dieta para personas con intolerancias, alergias y otras restricciones alimentarias.

una disolución de azúcares (lactosa) que tiene emulsionadas gotas de grasas y mantiene en suspensión micelas de caseinato de calcio. O en la clara de huevo, que corresponde a un sol (coloide), una dispersión acuosa de proteínas globulares diversas que en conjunto denominamos albúminas. En la cocina se trabaja también con productos resultantes de la trituración de determinadas partes de plantas, como harinas, féculas o especias en polvo, cuya descripción química suele ser muy compleja.

Pero la mayor parte de alimentos corresponden a organismos enteros (una sardina, un rábano) o a sus despieces (una pierna de cordero, una flor de calabacín). A su vez, se hallan estructurados en órganos, tejidos y células. Por fin, en la cocina hallamos también objetos culinarios no existentes en la naturaleza, obtenidos a partir de los productos anteriores mediante técnicas distintas (un fideo o una croqueta).

La composición química de los alimentos está lejos de ser conocida en su totalidad. Muchas de las moléculas constituyentes, que a su vez forman parte de mezclas complejas, corresponden a estructuras de gran tamaño, como las macromoléculas del almidón o las proteínas. La mayoría no tiene una fórmula molecular definida; pueden presentarse en forma de mezclas de familias de sustancias. Un aceite natural, por ejemplo, corresponde a una mezcla de ésteres formados por combinación de la glicerina con ácidos grasos de toda la gama de longitudes de cadena, quizá con cadenas saturadas y otras insaturadas en el mismo triglicérido, y con isómeros de cadena. Por ello, conceptos simples como solubilidad o punto de fusión no tienen en muchos casos significado para productos de uso gastronómico. La química permite el análisis de las moléculas biológicas constitutivas del conjunto, pero es la biología molecular la que describe las estructuras biológicas, responsables en gran parte de su comportamiento, también del culinario.

La interacción fisicoquímica de sustancias y objetos culinarios entre ellos y con baños de cocción (agua, aceites o grasas a

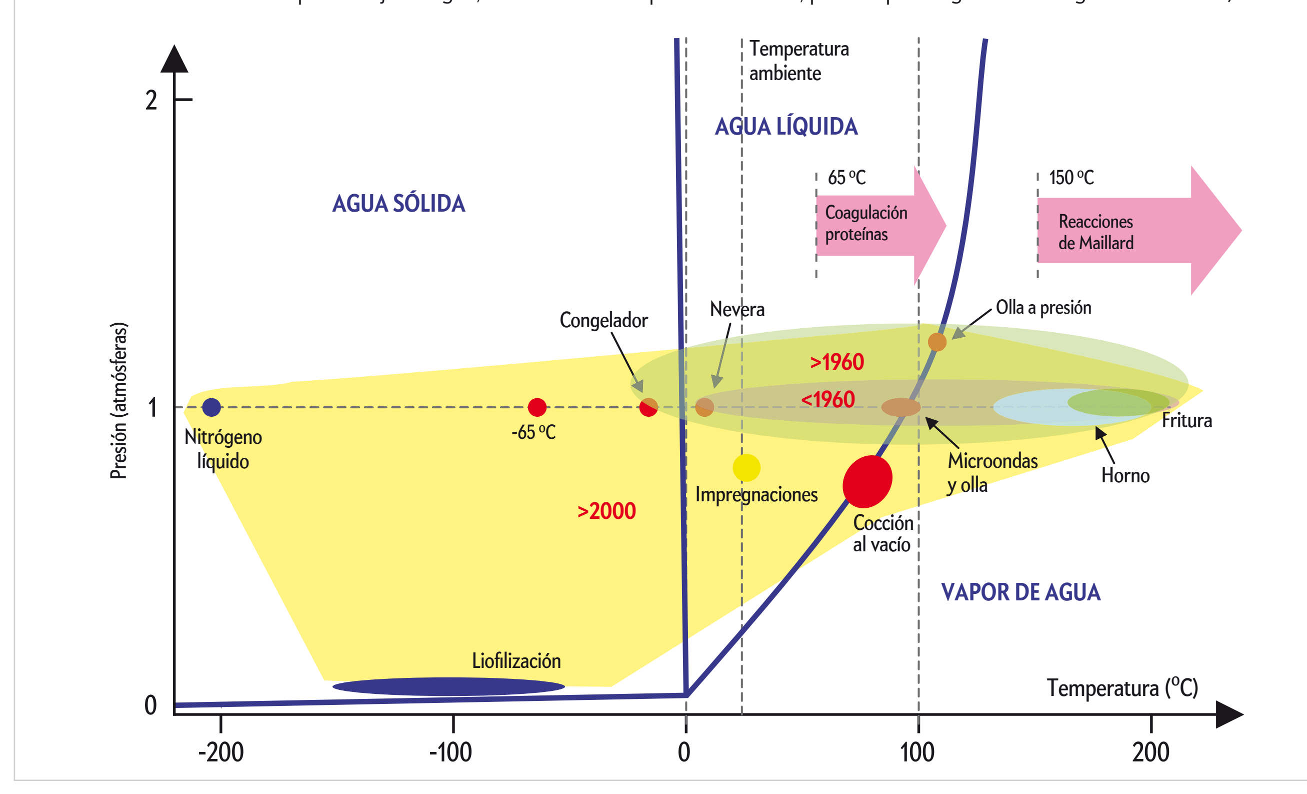
TEMPERATURA Y PRESIÓN

Diagrama de cocciones

En este diagrama se ubican las operaciones más habituales en las cocinas domésticas y del restaurante en función de la temperatura y presión de operación. Se indica también su evolución con los años. Las operaciones de hervir a presión ambiente, hornear, freír y conservar los alimentos en un entorno frío son clásicas y se vienen realizando desde hace miles de años. A partir de 1960 se introduce de forma masiva en la sociedad del bienestar occidental la congelación, la olla a presión y posteriormente el horno de microondas.

En fecha más reciente se han desarrollado operaciones culinarias que no han llegado todavía de forma masiva a restaurantes y domicilios —algunas quizá no lo hagan nunca—, pero que cada día son más utilizadas en todo el mundo. En particular, las operaciones que configuran la cocina al vacío: cocciones a baja temperatura y presión, e impregnaciones. Se van introduciendo procesos criogénicos como las congelaciones a baja temperatura (−65 ºC) y la utilización del nitrógeno líquido a presión ambiental (−196 ºC). También se ha usado la liofilización. Asimismo, siguiendo a la industria alimentaria, empieza a aplicarse la técnica de las altas presiones para preservar productos y elaboraciones sin recurrir al calor.

El diagrama de fases del agua (*líneas azules*) informa sobre el estado físico de la materia en cada punto. Dado que los alimentos contienen muy poca cantidad de agua libre, las ubicaciones de los puntos son solo aproximadas (un guisante fresco no congelará a 0 ºC por el hecho de contener cierto porcentaje de agua; lo hará a una temperatura inferior, puesto que el agua se halla ligada al alimento).



CORTESÍA DE LOS AUTORES

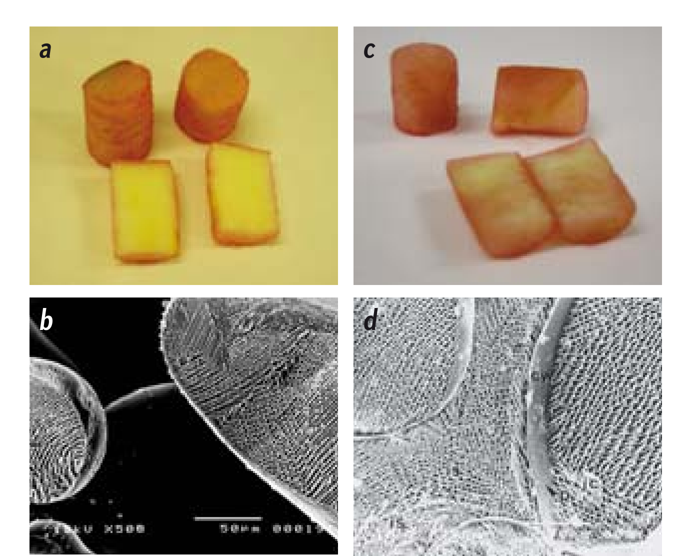
altas temperaturas) es muy compleja y en numerosos casos impredecible. La desnaturalización de las proteínas de los alimentos tiene lugar en una franja de temperaturas que depende de la proteína y el medio. Las reacciones químicas (caramelizaciones y, sobre todo, las de Maillard entre azúcares reductores y aminoácidos) generan nuevas moléculas que confieren color, olor y sabor a las cocciones, pero son procesos de gran complejidad y de difícil seguimiento. El entramado de reacciones que los componen no se conocen en detalle; además, cambios en la temperatura, el tiempo o el grado de mezcla de los componentes pueden hacer variar los productos finales. Añádase a ello que los procesos de cocción, excepto en el horno de microondas, suelen calentar del exterior al interior de la pieza. Se crea así un perfil de temperaturas, y también un gradiente de concentraciones, en el interior del alimento, que dependerá de la temperatura del baño exterior, la potencia de calefacción, el tamaño y geometría del alimento, y de cómo se modifican sus propiedades físicas y químicas (conductividad térmica, entre otras) al cambiar la composición.

Un aspecto no menor añade complejidad al diálogo entre ciencia y cocina. Los especialistas en la materia culinaria, los cocineros, han tenido una formación científica muy baja o nula. Además, a lo largo del tiempo se ha creado un argot técnico culinario que coincide con el vocabulario científico en los términos, pero no en el significado de los mismos. Para un científico, una emulsión es un sistema disperso constituido por una fase líquida aceitosa dispersa en una fase continua acuosa, o viceversa. Para un cocinero, en cambio, es un concepto más genérico que se extiende a todas las suspensiones y sistemas dispersos con una textura cremosa «de emulsión»; sin embargo, no incluye en esta categoría emulsiones como la leche.

La irrupción de grandes cocineros con intereses por la ciencia y por aplicar ideas de otras disciplinas a su profesión ha hecho posible a lo largo de los últimos años que poco a poco se vayan rompiendo las barreras de incomprensión mutua. Nos referimos, entre otros, a Ferran Adrià, Joan Roca, Heston Blumental, Andoni Aduriz, Carme Ruscalleda, Willy Dufresne, Grant Achatz, Quique Dacosta y Dani García. Se está produciendo una simbiosis entre la ciencia y la cocina de consecuencias todavía difíciles de valorar. No se trata ya de que la ciencia ilustre lo que ocurre al preparar un determinado plato clásico, sino que ofrezca recursos al cocinero para desarrollar nuevas técnicas y preparaciones.

LAS OPERACIONES CULINARIAS

Cualquier actividad culinaria se basa en utilizar unas materias primas procedentes de la naturaleza y procesarlas mediante distintas operaciones. En ocasiones, se genera un nuevo objeto que antes no existía. La industria de proceso suele distinguir las operaciones de logística (acopio y movimiento de materiales y productos) de las de procesado. En la ingeniería química, que es una ingeniería de procesos, se clasifican las operaciones en función de cuál sea la transferencia más relevante en que se basan. Hablamos, pues, de operaciones de transporte de cantidad de movimiento (circulación de fluidos por tuberías, filtración); de transmisión de calor (calefacción de fluidos, evaporación); y de transferencia de materia (destilación, extracción líquido-líquido). Se cuenta, además, con la operación unitaria química, que es la que estudia las reacciones. Tal clasificación resulta válida también para otros campos, en particular la ciencia y tecnología de los alimentos. La mayor parte de operaciones pueden llevarse a cabo en forma continua o discontinua, según el



Impregnación: **Debido a la estructura porosa de la fruta, cuando se macera según la técnica tradicional (*a*) quedan espacios vacíos (*negro* en *b*); ello causa ablandamientos, deshidrataciones y la consiguiente pérdida de turgencia. En cambio, si antes se hace el vacío, el aire que contienen los poros se expande y sale. Cuando se sumerge luego el producto en un líquido, este impregna los poros (*c*); al no quedar espacios libres (*d*), se conserva la textura.**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

tipo de proceso y caudales. En las cocinas domésticas y los restaurantes, todas las operaciones se desarrollan en discontinuo. Una clasificación práctica de las operaciones culinarias se basa en distinguir su naturaleza, operaciones físicas o químicas, y forma de operación, en frío o en caliente.

COCCIÓN AL VACÍO Y A BAJAS TEMPERATURAS

El término *cocción* significa, para el cocinero, la modificación de un alimento mediante su tratamiento a temperaturas superiores a la ambiente (hamburguesa a la plancha) o mediante un baño que modifica sus propiedades (boquerones en vinagre). En ambos procesos se provoca la desnaturalización de las proteínas del alimento, por el calor o la acidez del medio. Además, en la cocción a temperaturas elevadas se dan las reacciones de Maillard, que modifican el color, olor y sabor del alimento de forma más pronunciada. En este artículo el término *cocción* se referirá solo a la primera acepción: tratamiento térmico a temperatura superior a la ambiente.

La «cocción a baja temperatura» se lleva a cabo a temperaturas inferiores a las de los métodos clásicos. Las cocciones clásicas en un medio acuoso suelen producirse por ebullición, que tiene lugar a presión atmosférica a temperaturas algo superiores a la del punto de ebullición del agua, debido al efecto ebulloscópico generado por la presencia en el agua de sales y otros componentes disueltos. En las ollas a presión, la temperatura de cocción es superior; puede llegar a los 120 ºC. Las cocciones en baños de aceite (frituras) tienen lugar a temperaturas muy superiores, hasta los 190 ºC o más, según el aceite empleado.

La cocción a baja temperatura pretende llegar a la temperatura de desnaturalización de las proteínas, pero sin que tengan lugar las reacciones de Maillard (entre 50 y 100 ºC). Esta cocción se denomina también cocción al vacío porque suele practicarse con el alimento crudo introducido en una bolsa de plástico termorresistente en ausencia total o parcial de aire (por de-

bajo de 50 milibares). El alimento puede estar seco o llevar consigo algún tipo de líquido de cocción para modificar su sabor. La cocción suele llevarse a cabo en un baño de agua termostatizado o Roner; asimismo, puede usarse un horno de vapor con control de temperatura [*véase* «Cocina al vacío», por Pere Castells; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2010].

Un aparato alternativo al Roner es la Gastrovac, que al producir un vacío continuo ofrece una nueva perspectiva. Fue desarrollado por los cocineros Javier Andrés y Sergio Torres, junto con Puri García y Javier Martínez, de la Universidad Politécnica de Valencia. Se trata de una olla conectada a una bomba de vacío, con calefacción y control de la temperatura, que permite trabajar en condiciones de ebullición con el alimento sumergido en un líquido y a temperaturas inferiores a la de ebullición del agua. Las presiones a las que se puede trabajar llegan a unos 20 kilopascales (un 20 por ciento de la presión atmosférica normal); a dicha presión, el agua hierve a 60 ºC. También permite freír a temperatura baja, alrededor de 90 ºC (las frituras tradicionales suelen realizarse a 160 ºC como mínimo).

La impregnación, o efecto esponja, es una técnica que pretende la penetración profunda de líquidos en un sólido poroso. Se basa en el hecho de que la mayoría de los alimentos tienen poros, ocupados por aire. Cuando el alimento se somete al vacío, se retira buena parte de ese aire. Si se sumerge entonces en un líquido, cuando se vuelve a instaurar la presión atmosférica el líquido ocupa los poros vacíos e impregna el sólido. Este proceso se lleva a cabo a temperatura ambiente; puede realizarse en la Gastrovac, en la máquina de vacío o en un rotavapor —aparato que presentaremos en el siguiente apartado—. La técnica del vacío también se ha utilizado en la cocina, si bien de forma minoritaria, para acelerar la filtración.

DESTILAR AL VACÍO

La técnica de la destilación al vacío, muy utilizada en los laboratorios químicos, se ha introducido con éxito en los restaurantes de la mano de Joan Roca en el Celler de Can Roca. Se basa en la aplicación del rotavapor, un aparato que destila en rotación acoplado a una bomba de vacío (su versión culinaria corresponde al Rotaval). El vacío continuo hace que la ebullición se produzca a temperaturas inferiores a las que tiene lugar a presión atmosférica. A temperaturas bajas y a muy bajas presiones se obtiene un vapor destilado que, posteriormente condensado, concentra los componentes más volátiles del producto original, entre ellos buena parte de sus aromas frescos. Ello permite extraer sustancias aromáticas sin que estas se degraden por la acción del calor [*véase* «La destilación llega a la cocina», por Pere Castells; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2011].

COCINAR CON NITRÓGENO LÍQUIDO

Ya hace muchos años que se pensó en aplicar la refrigeración criogénica a la cocina [*véase* «Química y física de la cocina», por Nicolas Kurti y Hervé This; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1994]. Sin embargo, el uso culinario del nitrógeno líquido no pasó de anécdota. A principios del siglo XXI, Heston Blumental empezó a utilizarlo en su restaurante The Fat Duck. Los comensales podían degustar platos como el «té nitro-verde y *mousse* de lima», tras presenciar el espectacular final de la elaboración, que se realizaba en la propia sala. La emergente cocina española recogió el testigo: en 2003, Ferran Adrià y Dani García empezaron a desarrollar sus preparaciones, hoy ya consolidadas.

Las dificultades que entraña el uso culinario del nitrógeno líquido, los problemas de suministro y la presencia del parásito anisakis en los pescados han provocado la introducción en las cocinas de técnicas industriales de frío utilizadas para mantener temperaturas más bajas que las de los congeladores domésticos, que no llegan a menos de –30 ºC. El congelador de –65 ºC utilizado ya en laboratorios para conservar productos especiales, y que funciona simplemente mediante el suministro eléctrico, ya está llegando a las cocinas; a tan baja temperatura pueden congelarse incluso destilados alcohólicos.

LA LIOFILIZACIÓN

La liofilización corresponde a una operación unitaria de transferencia simultánea de calor y materia. Consiste en la vaporización del contenido de agua de una sustancia por sublimación, directamente de fase sólida a fase vapor. Se requiere para ello que la sustancia esté congelada y que el entorno tenga una presión de vapor de agua muy reducida. Se trabaja a temperaturas muy bajas, con una suave calefacción al vacío y posterior condensación del vapor de agua obtenido. Se consiguen productos muy secos, de volumen parecido al del producto fresco, pero cuya masa se ha reducido de forma notable. Se trata de una técnica común en la industria farmacéutica y también en determinadas aplicaciones alimentarias, como la preparación de cafés solubles y alimentos desecados para expediciones o misiones espaciales. La reconstitución del alimento requiere solo su mezcla con agua.

Desde el punto de vista culinario, las bajas temperaturas evitan alteraciones en el producto y también pérdidas de componentes volátiles, con lo que se conservan gustos y aromas. El equipo consta de un sistema de frío, un secadero de bandejas al vacío con calefacción eléctrica, un sistema de condensación y una unidad de generación de vacío. Dado el coste del equipo y las dificultades técnicas de su aplicación culinaria, es probable que la liofilización no se implante en las cocinas y prosiga su desarrollo solo en la industria alimentaria.

TEXTURAS CULINARIAS

El término *textura*, muy usado por los cocineros, no tiene una definición única. Se refiere a la sensación global percibida al ingerir un alimento, resultado de la integración de las diversas percepciones de los receptores sensoriales, especialmente los del tacto.

Existe un sinfín de texturas. Tantas o más que tipos de alimentos. Numerosas denominaciones descriptivas de los alimentos corresponden a texturas: harinoso, fibroso, *fondant*, gelatinoso, jugoso... La clasificación de texturas según la Asociación Española de Normalización y Certificación incluye 40 descriptores, cla-



Liofilización: La aplicación culinaria de esta técnica ha permitido obtener nuevas texturas como esta espuma seca de pistacho.

EL BULLI

sificados en once atributos (dureza, adherencia, estructura y carácter graso, entre otros), que, a su vez, derivan de tres tipos de propiedades (mecánicas, geométricas y de superficie). La determinación precisa de las texturas se realiza mediante máquinas de ensayos mecánicos (texturómetros o reómetros), y pruebas organolépticas con voluntarios o bocas artificiales calibradas.

Todo restaurador persigue la obtención de texturas específicas o la modificación de las texturas de un alimento para cambiar nuestra percepción del mismo. Para ello se han seguido distintas vías de trabajo, entre las que destaca el uso de sustancias que modifican las propiedades físicas de los alimentos y, sobre todo, sus características mecánicas relacionadas con la deformación y el flujo (viscosidad, fragilidad, elasticidad, plasticidad, modificación con la temperatura, etcétera). Son las denominadas —con cierta imprecisión científica— sustancias texturizantes. (Cabe destacar la imposibilidad de erradicar del lenguaje común el uso del término *densidad* para referirse a la propiedad que en lenguaje científico se conoce como *viscosidad*.)

La utilización de texturizantes en la cocina se remonta a tiempos inmemoriales. Según la región, se han utilizado harinas, almidones, gelatina, agar-agar, carragenatos y otros muchos. En los últimos años se ha desarrollado en el ámbito culinario el estudio sistemático de texturizantes, entre los cuales los hidrocoloides y emulsionantes desempeñan un papel principal. La industria de materias primas alimentarias ha puesto a disposición de los restauradores una gran variedad de extractos de productos con propiedades gelificantes y espesantes. En las sociedades occidentales, en la cocina se usaba a modo de gelificante la gelatina obtenida de la cola de pescado; a modo de espesantes, los almidones. Solo en algunos casos, como en mermeladas, confituras y jaleas, se utilizaban pectinas. En Oriente, el agar-agar viene utilizándose desde hace tiempo, sobre todo para la producción de pastas.

En 1998 el restaurante El Bulli comenzó a utilizar agar-agar para la obtención de gelatinas calientes, que presentaban diferencias notables en textura y propiedades físicas con las gelatinas derivadas de la cola de pescado. A principios de este siglo, Heston Blumental se decantó por la goma gellan (polisacárido producido por la bacteria *Pseudomonas alodea*); Willy Dufresne, en cambio, por la metilcelulosa. Pero es el año 2003 el que marca el nacimiento de una revolución culinaria, al desarrollar El Bulli sus técnicas de «esferificación», basadas en el uso del alginato de sodio a modo de gelificante parcial.

También a principios del siglo XXI el uso de emulsionantes con propiedades espumantes da lugar a lo que en cocina se han denominado *aires*, que no son más que espumas, sistemas dispersos con un contenido de aire muy elevado, producidos con la ayuda de agitadores en la interfase gas-líquido. Los emulsionantes permiten mantener una mezcla de dos o más componentes no miscibles (agua y aceite) durante un largo período de tiempo porque reducen la tensión superficial. Ello se debe a su naturaleza anfipática: poseen una parte soluble en agua (hidrófila) y una parte soluble en grasa (hidrófoba o lipófila). En la cocina se han utilizado estos productos también a modo de espumantes (pensemos en la espuma-aire de zanahoria que protagonizó la portada del *New York Times Magazine* en agosto de 2003).

A principios de 2004 se produce la gran eclosión de los texturizantes. Además de los diferentes gelificantes ya mencionados, emerge la xantana, un espesante que, a diferencia de la harina y los almidones, puede actuar en frío. Su facilidad de utilización la convierte rápidamente en un gran recurso a la hora de elaborar texturas insólitas. Además de espesar, posee propiedades gelificantes suaves que han permitido mantener suspendidas en el seno del líquido pequeñas partículas sólidas visibles a simple vista, que no sedimentan debido a la elasticidad del líquido débilmente gelificado (efecto suspensor).



Emulsionantes: La función emulsionante de la lecitina permite obtener espumas a partir de muestras acuosas.

EL BULLI

El gelificante clásico en la cocina occidental ha sido durante largo tiempo la gelatina de cola de pescado (obtenida en realidad de pieles y otros tejidos del ganado vacuno y porcino) y la pectina (derivada de frutas) para mermeladas, confituras y jaleas. Pero las cosas han cambiado. En el año 2000 se produjo una crisis de seguridad alimentaria que en apariencia nada tenía que ver con los gelificantes: se supuso que diversos casos de síndrome de Creutzfeldt-Jakob podían derivar de casos de encefalopatía espongiforme bovina (enfermedad de las vacas locas). Este síndrome se relacionó rápidamente con el uso de la gelatina que se venía obteniendo de las vacas, por lo que el procedimiento se descartó de inmediato. Toda la gelatina pasó a obtenerse únicamente del cerdo. Sin embargo, dado que la venta de productos gelificados con gelatina de cerdo no era posible en los países musulmanes, se buscaron otras alternativas de origen vegetal. Así, comenzaron a potenciarse y popularizarse el agar-agar, los carragenatos, los derivados de celulosa, la goma gellan y también el alginato.

ESFERIFICACIONES

La esferificación consiste en la transformación de un alimento en esferas líquidas. Mediante la gelificación de la interfase entre dos sustancias, se obtiene una vesícula, o esfera, gelificada en la superficie y líquida por dentro. La preparación obtenida es esférica porque esta es la forma que permite minimizar el área de la interfase entre los dos líquidos y, por tanto, la energía del sistema [*véase* «La esferificación», por Pere Castells; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2008].

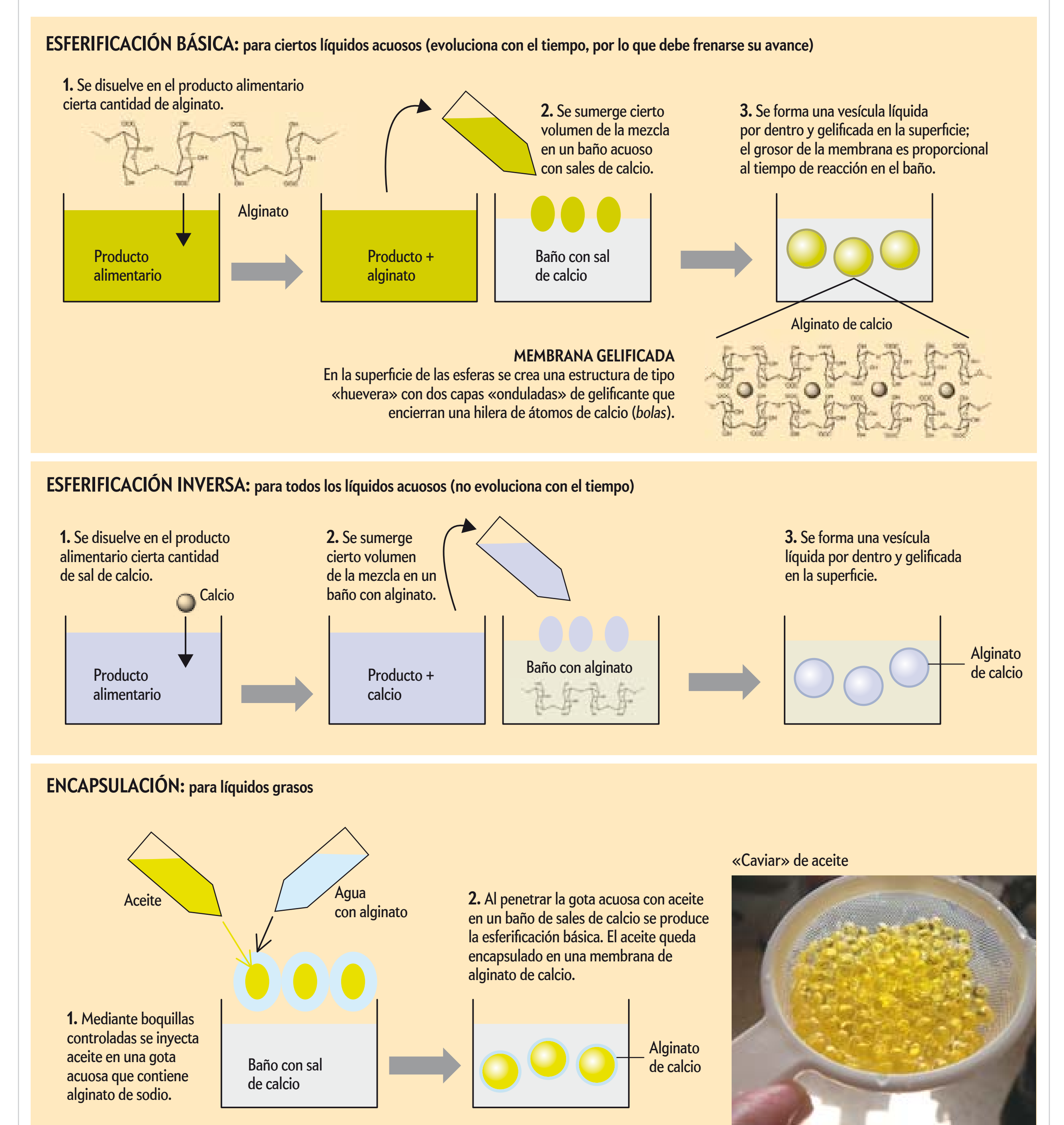
Desde el punto de vista culinario, la esferificación representa un salto adelante en las técnicas utilizadas en líquidos, ya que nos permite tener dos texturas: líquida en el interior y casi sólida (gelificada) en el exterior. Incluso pueden introducirse gases en la esfera, de modo que se obtiene una preparación con los tres estados básicos de la materia.

El primer y principal agente gelificador de las esferificaciones han sido los alginatos. El ácido algínico y los alginatos son productos ampliamente extendidos en la industria alimentaria;

Esferas líquidas

Una de las aplicaciones culinarias más revolucionarias de los gelificantes corresponde a la esferificación: la transformación de un alimento en esferas líquidas. La técnica se basa en producir la gelificación de la interfase entre dos sustancias, de modo que se obtiene una vesícula gelificada en la superficie y líquida por dentro. El gelificante más utilizado es el alginato.

El proceso varía ligeramente en función de la composición del alimento que se quiere esferificar. A los líquidos acuosos que no contienen calcio o no son ácidos se les puede aplicar el procedimiento estándar (esferificación básica). Pero este proceso tiene un inconveniente: acaba gelificando todo el interior. Para evitar la gelificación total de la esfera puede permutarse el orden de aplicación de los reactivos, de modo que los iones de calcio se hallarán en el interior de la esfera y el alginato en el baño exterior (esferificación inversa); este método es aplicable a líquidos acuosos, incluidos los lácteos y los ácidos. Los líquidos grasos deben primero envolverse en una capa acuosa que admita la disolución de los reactivos (encapsulación).



FUNDACIÓN ALICIA (*caviar de aceite*)



Texturizantes: **El gelificante agar-agar permite preparar tortilla de patatas sin huevo y otros platos apetitosos para personas con intolerancias alimentarias.**

FUNDACIÓN ALICIA

se emplean a modo de gelificantes, espesantes o estabilizantes. Su rapidez en la gelificación, el hecho de no necesitar calor ni cambios bruscos de temperatura y su fácil disolución los convierten en un gran recurso para la industria alimentaria. Los alginatos se elaboran a partir de algas pardas deshidratadas. El alginato de sodio es una sal sódica de un hidrato de carbono de tipo fibroso extraído de algas *Macrocystis*, *Fucus* o *Laminaria ascophillum*.

La esferificación básica corresponde a la formación de una membrana de alginato de calcio debido a la introducción de una solución de alimento y alginato en un baño acuoso con sal de calcio. Sin embargo, este procedimiento no es aplicable a todos los alimentos. Con el objetivo de ampliar el espectro de productos «esferificables», la técnica se ha ido refinando y modificando.

Si el alimento es ácido, en la interfase no se forma una membrana de alginato de calcio, sino que se obtiene ácido algínico. La función correcta del alginato exige unas condiciones de trabajo neutras o poco ácidas (*p*H superior a 5). Para reducir la acidez puede añadirse citrato de sodio, que es de muy fácil disolución y actúa de manera casi instantánea. Con todo, resulta poco útil en ingredientes muy ácidos (zumo de cítricos o piña).

En los productos lácteos la dificultad es otra. Al tener estos una elevada proporción de calcio, gelifican al mínimo contacto con el alginato, por lo que el proceso se descontrola. La solución a este problema llegó en 2005 con el desarrollo de la esferificación inversa, que se basa en disolver primero la sal de calcio en el producto lácteo y luego sumergir la mezcla en un baño con alginato.

Pero aparece entonces otro problema: el sabor de la sal de calcio, que se nota demasiado en la preparación. Una posible estrategia: utilizar una mezcla de gluconato de calcio y lactato de calcio (gluconolactato de calcio). Sin embargo, dado que la viscosidad de la solución de agua con alginato de sodio es superior a la de la mezcla acuosa con calcio, la esferificación no se produce adecuadamente. La solución es, pues, aumentar la viscosidad del producto con calcio, lo que se logra con un espesante como la goma xantana.

En 2006, la esferificación se extendió también a los aceites mediante la técnica de encapsulación. Primero, un sistema de boquillas controladas inyecta aceite en una gota que contiene alginato de sodio. Luego, se sumerge la gota de agua con aceite en un baño con sales de calcio, donde tiene lugar la esferificación clásica. El resultado: una gota de aceite encapsulada en una membrana de alginato de calcio. Este año han empezado a comercializarse encapsulados de aceite.

MEJORAR LA DIETA

Los nuevos conocimientos sobre «texturizantes» culinarios se están aplicando, sobre todo, en el campo de la dietética. Estos productos se utilizan para el diseño de dietas especiales para hospitales y escuelas, que a menudo deben atender las necesidades alimentarias de personas con intolerancias y alergias.

Esos nuevos ingredientes permiten preparar una tortilla de patatas sin huevo. ¿Cómo se logra la textura deseada? Con un gelificante, el agar-agar. Del color y parte del sabor se encarga el azafrán. Por su parecido visual y organoléptico con una auténtica tortilla española, esta elaboración resulta idónea para personas intolerantes al huevo o con trastornos metabólicos como la fenilcetonuria, que no permite la ingesta de fenilalanina, un aminoácido.

Las nuevas técnicas permiten preparar también elaboraciones a base de frutas y verduras apetecibles para los más pequeños. Ello contribuye a la mejora de sus hábitos alimentarios y a la prevención de posibles casos de obesidad. La Fundación Alicia está llevando a cabo varios proyectos con estos objetivos.

Otro ejemplo representativo corresponde a la xantana, una goma que por su grado de elasticidad resulta especialmente indicada para la obtención de texturas para disfágicos. Estas personas tienen problemas de deglución debidos a la edad avanzada o como consecuencia de determinados tipos de cáncer.

La aplicación de principios científicos en la cocina acaba de empezar. En poco tiempo se han revolucionado los instrumentos, las técnicas y las preparaciones y productos. Da la impresión —salvando las distancias— de que la cocina científica se encuentra en una situación análoga a la industria del petróleo de principios del siglo XX. Unas materias primas como el petróleo o el carbón, hasta entonces usadas como fuente de combustibles con una somera separación, permitieron desarrollar a lo largo del siglo industrias tan variadas como la carboquímica y la petroquímica, con infinidad de nuevos productos, algunos artificiales. Del mismo modo, el uso juicioso de operaciones de procesado y reacciones químicas controladas podrían permitir la obtención de una gran variedad de nuevas preparaciones, con nuevos sabores y nuevas texturas a partir de las materias primas culinarias hoy conocidas y otras nuevas aún desconocidas o poco valoradas hasta hoy.

PARA SABER MÁS

Tratado elemental de cocina. Hervé This. Acribia; Zaragoza, 2002.

La ciencia y los fogones de la cocina molecular italiana. D. Cassi y E. Bocchia. Ediciones Trea; Gijón, 2005.

La cocina y los alimentos. H. McGee. Random House Mondadori; Barcelona, 2007.

Molecular gastronomy: a food fad or science supporting innovative cuisine? César Vega y Job Ubbink en *Trends in Food Science & Technology*, vol. 19, págs. 372-382, 2008.

Manual de gastronomía molecular. Mariana Koppmann. Siglo XXI Editores; Buenos Aires, 2009.

A new research platform to contribute to the pleasure of eating and healthy food behaviors through academic and applied food and hospitality research. Agnès Giboreau y Hervé Fleury en *Food Quality and Preference*, vol. 20, págs. 533-536, 2009.

Stability of sous-vide cooked salmon loins processed by high pressure. Pierre A. Picouet et. al. en *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 12, págs. 26–31, 2011.



Ulrich Maschwitz, profesor en la Universidad Johann Wolfgang Goethe de Frankfurt hasta el 2003, investiga el comportamiento y la ecología de las colonias que forman los insectos, en especial las hormigas de las selvas tropicales de Asia.

Martin Dill ha investigado la simbiosis de las hormigas en Asia tropical. Se doctoró en Frankfurt con un estudio sobre comportamiento, ecología y sistemática de las hormigas pastoras en el sudeste asiático.

Volker Witte, doctor en biología, estudia la ecología química de las hormigas en la Universidad Ludwig Maximilian de Múnich.

ZOOLOGÍA

Hormigas nómadas en la jungla

Igual que los ganaderos nómadas, las hormigas pastoras recorren las selvas tropicales del sudeste asiático en busca de pastos frescos para sus particulares rebaños de pulgón

Ulrich Maschwitz, Martin Dill y Volker Witte

Exuberante selva tropical malaya. Sobre un nuevo brote de hojas, una aglomeración de hormigas cubre casi por completo una capa de pulgones chupadores. Aunque la imagen no parece espectacular, a los investigadores nos sorprendió gratamente. Observábamos algo que antes, unos veinte años atrás, no podíamos sospechar: nos hallábamos ante una forma de vida hasta entonces desconocida, por lo menos entre las hormigas.

El resto no nos cogió desprevenidos. Al fin y al cabo, ninguna otra familia animal ha desarrollado formas de vida tan diversas como las organizadas hormigas. Ya en los manuales de principios del siglo pasado se puede leer sobre hormigas cultivadoras de hongos, jardineras, cazadoras, tejedoras, cosechadoras e incluso ladronas y negreras; denominaciones que en su momento se eligieron por su asociación con formas de vida humana, ya se consideraran positivas o negativas. En 1906, el ingeniero forestal y entomólogo Karl Escherich escribió sobre las hormigas criadoras de hongos: «Así como la gente cultiva plantas, las hormigas crean productos que en la naturaleza no existen. En este caso la analogía con la conducta humana es lo más sorprendente».

Nuestro estudio ha revelado, a lo largo de los años, otra conducta en las hormigas que recuerda asombrosamente a otro estilo de vida humano: el de los ganaderos nómadas. Los pastores se han adaptado por completo a las necesidades de sus rebaños, que les proporcionan leche, carne, pieles y otros recursos vitales. Con sus tiendas de campaña, estos grupos acompañan al ganado a nuevos sitios de pasto. Las hormigas pastoras —tal y como las bautizamos— han cambiado su estilo de vida sedentario original por otro orientado a ofrecer lo mejor a sus «animales útiles» y aprovecharse en lo posible de sus capacidades.

EN SÍNTESIS

Muchas hormigas que «ordeñan» pulgones, cochinillas y otros insectos chupadores de plantas que segregan melaza abundan en la naturaleza. Pero solo en los bosques tropicales asiáticos se desarrolla una comunidad simbiótica parecida a la de los pastores y su ganado.

Con esta insólita forma de vida animal evolucionó, de modo asombroso y para el beneficio de ambas partes, la morfología corporal, la conducta y el modo de reproducción de los dos organismos de esta asociación.

Aunque la simbiosis entre las hormigas pastoras dolicoderinas y las cochinillas solo se ha producido una vez a lo largo de la evolución, la asociación se ha perfeccionado y ampliado de modo eficaz.

ULRICH MASCHWITZ



En la pluviselva de la Malasia occidental los autores descubrieron una concentración de hormigas dolicoderinas de la especie *Dolichoderus cuspidatus*, que protegían a las cochinillas del género *Malaicoccus* en un brote de hojas. Resultó ser una forma de vida simbiótica desconocida hasta el momento, análoga a la relación entre los pastores y sus rebaños.

Las aglomeraciones de estos animales en los brotes de plantas se asemejan a las que observamos en nuestros jardines y bosques de Europa: las hormigas y los pulgones se reúnen para una simbiosis alimentaria y protectora. En esta colaboración de beneficio mutuo las hormigas reciben la savia nutritiva que segrega el pulgón, la melaza y, como contrapartida, estos insectos sociales protegen de depredadores y parásitos a sus proveedores.

Solo una mirada más atenta nos revela que la asociación que estudiamos en la pluviselva, compuesta por la hormiga dolicoderina *Dolichoderus cuspidatus* y una cochinilla del género *Malaicoccus*, no representa una simbiosis alimentaria y protectora habitual. En nuestra región, si agitamos suavemente con el dedo una de las hojas donde se encuentran las hormigas, estas reaccionan de manera agresiva para escapar rápidamente sin los pulgones. Comportamiento muy distinto al de las hormigas pastoras. Ante una molestia tan insignificante, las obreras de esta especie siguen preocupándose por sus cochinillas. Las arrancan de la hoja con las pinzas de la mandíbula y se las llevan consigo (igual que las abejas, las hormigas obreras son todas hembras). Si se volviera a molestar al grupo, acudirían numerosas hormigas para coger el preciado bien; de entrada tienen preferencia las cochinillas hembra, del tamaño de la cabeza de una hormiga. Con delicados movimientos de la cabeza, toman las pequeñas larvas y las apilan. Al contrario que el pulgón tradicional, las cochinillas de esta simbiosis no se defienden de la acometida, sino que empiezan a desplazarse y a establecer contacto con las hormigas.

Incluso cuando no perturbábamos a la comunidad, los caminos entre la colonia de hormigas y el sitio de pasto estaban llenos de hormigas obreras con cochinillas en ambas direcciones. Sorprendentemente, estas se acomodaban incluso en el nido. En el interior de la colonia, entre las amontonadas obreras y las crías, se hallaban numerosas cochinillas de todas las edades. Tal y como comprobamos, las hembras preñadas tienen preferencia para entrar en el nido y así dar a luz en un lugar protegido. Los machos, en este caso, están de más: las cochinillas se multiplican sobre todo mediante partenogénesis, una forma de reproducción basada en el desarrollo de células sexuales femeninas no fecundadas.

¿Cómo se denominan?

Debido a su heterogeneidad y a la gran diversidad de especies, los insectos tropicales a menudo solo se conocen por su nombre científico. *Dolichoderus cuspidatus*, una hormiga dolicoderina, significa literalmente «picadora de cuello largo». Si, como en el caso de numerosas cochinillas tropicales, la especie no es reconocible, entonces solo se nombra el género: *Malaicoccus*, que significa «cochinilla malaya».

LA NECESIDAD DE PASTO

Sin embargo, las hormigas pastoras suelen mover a las cochinillas con otro objetivo: trasladar el «rebaño» de un pasto a otro. Si se observan los lugares de pasto de la colonia durante un largo tiempo —a veces docenas de sitios a la vez— se puede presenciar en ocasiones un espectacular traslado repentino. Todas las partes que se pueden succionar de una planta, o incluso de un pequeño árbol, son consumidas en pocas horas. Todo se lleva a cabo de una manera ordenada. Las plantas son desalojadas casi al mismo tiempo pero no todas las cochinillas se llevan de inmediato a un sitio nuevo. Mediante una acción a gran escala, las portadoras depositan primero las cochinillas en un almacén provisional, como una hoja muerta en el suelo. Ahí, vigilado por las obreras, el rebaño espera su nuevo sitio de pasto. ¿A qué se debe este hecho tan desconcertante? ¿Por qué se abandonan los viejos sitios de pasto? ¿Qué provoca esta marcha colectiva? ¿Cómo se encuentran los nuevos pastos y se comprueba su calidad?

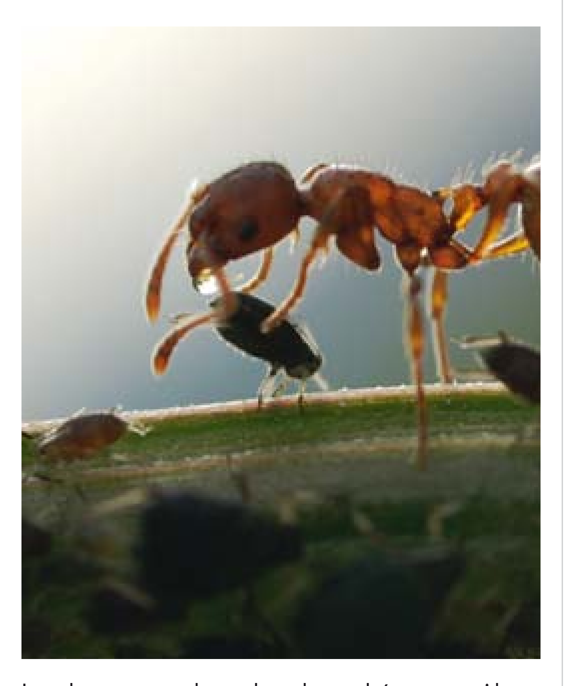
LA ASOCIACIÓN

La melaza en la simbiosis nutritivo-protectora

Los insectos como pulgones, cigarras y chinches producen melaza, un líquido azucarado. Estos animales, todos del orden de los hemípteros, introducen sus maxilares en forma de trompa en el finísimo sistema vascular de la planta que distribuye la savia, un líquido que contiene, además de una gran proporción de azúcar (el producto primario de la fotosíntesis), pequeñas cantidades de aminoácidos y otros compuestos elaborados por las plantas. Los insectos «beben» el jugo nutritivo sin necesidad de succiones, ya que este se halla sometido a una alta presión que se regula más tarde en su tubo digestivo.

Los hemípteros resorben principalmente los aminoácidos del jugo y segregan el agua por el ano, junto con los excedentes de azúcar y restos de aminoácidos. Para no ensuciarse con esta melaza, un sustrato potencial para bacterias y hongos, de vez en cuando los hemípteros expulsan lejos el pegajoso contenido del recto.

A lo largo de la evolución, muchas hormigas han «aprendido» a asociarse con los hemípteros y a explotar su nutritiva melaza. A través de señales acústicas y avisos táctiles con las antenas y las extremidades atraen a sus compañeros de simbiosis. Ingieren con esmero la excreción azucarada de su «rebaño», a la vez que lo protegen de ladrones y parásitos. Esta colaboración alimentario-protectora (trofobiosis), ventajosa para ambas partes, es especialmente estrecha en las hormigas pastoras.



La melaza es segregada por el ano de un pulgón y es recogida por una hormiga.

Para contestar a estas preguntas hemos examinado numerosas colonias durante tiempo y hemos descubierto detalles reveladores. A diferencia de muchas de sus especies emparentadas, las cochinillas de las hormigas pastoras succionan la savia de una enorme variedad de plantas: casi 200 especies de 57 familias y 38 órdenes. Figuran entre ellas ranunculáceas, leguminosas y compuestas, así como bambús y palmeras; incluso plantas sin flor, como algunas variedades de helechos. Da igual si son árboles, arbustos, lianas o hierbas; o que se trate de hojas, retoños, capullos, flores o frutos. Pero todas las plantas o partes escogidas presentan un rasgo común: son, sin excepción, tiernas y todavía están creciendo o madurando.

De ahí el sentido de este cambio de lugar de pasto y la búsqueda de sitios nuevos donde alimentarse. Los pulgones obtienen siempre así el jugo nutritivo de las plantas en desarrollo que, además de carbohidratos, contiene abundantes aminoácidos y otras sustancias de primera necesidad. Los insectos chupadores producen de este modo una melaza nutritiva, suficientemente rica como para que a las hormigas les sirva de sustento único. Gracias a esta estrategia, las hormigas pastoras no deben recurrir a otras fuentes de proteínas. Nunca las vimos acechar a una presa, como hacen algunas de sus parientes, que aunque también se alimentan de melaza, no son nómadas. Ni una sola vez establecieron sus caminos o sitios de comida cerca de alimentos ricos en proteínas, como una puesta de escarabajos. Aunque tampoco rechazaban un hallazgo casual.

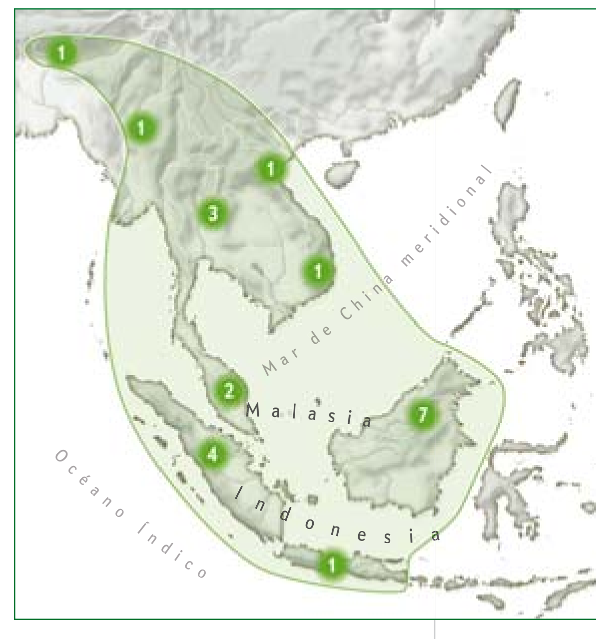
BIOGEOGRAFÍA

Expansión eficaz

Todas las especies de hormigas pastoras se concentran en una vasta región del sudeste asiático. Esta zona se extiende desde Sikkim, en la región del Himalaya, hasta Java, al sur del ecuador, y desde Vietnam hasta las islas al oeste de Sumatra. No han llegado a la India ni han cruzado hacia el este la línea biogeográfica que separa la zona de fauna asiática de la australiana.

La mayor diversidad de especies se halla en la isla de Borneo, donde tan solo en el macizo de Kinabalu, de 4000 metros de altura, se encuentran seis comunidades de hormigas pastoras, cada una formada por especies de hormigas y géneros de cochinillas distintos. Cinco de ellas comparten un mismo espacio vital en la zona más baja. La sexta vive arriba, en las montañas, donde ascienden a la zona nublada, a más de 2000 metros. A esa altitud ya no medran otras especies de hormigas.

Hacia el sur y el norte disminuye el número de comunidades pastoras. Nunca se alejan de los húmedos bosques tropicales de hoja perenne. En las zonas monzónicas del norte y centro de Tailandia, donde abundan los bosques caducifolios de las tierras bajas, las hormigas pastoras solo viven en las regiones montañosas y lluviosas ricas en especies perennifolias.



Las hormigas pastoras se encuentran solo en los bosques tropicales del sudeste asiático. El mayor número de especies conocidas (*cifras en círculos*) se sitúa en Borneo, su supuesto lugar de origen.

Cuidado del rebaño

Ante el peligro, las hormigas trasladan a las cochinillas del mismo modo en que las llevan a nuevos sitios de pasto. La fotografía muestra una obrera de la especie *Dolichoderus tuberifer* que ha prendido con las pinzas de su mandíbula una gran hembra de *Malaicoccus*. Esta mantiene las patas y las antenas plegadas sobre su propio cuerpo.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT/EMDE-GRAFIK, SEGÚN MASCHWITZ Y DILL (*mapa*); MARTIN DILL (*abajo*)

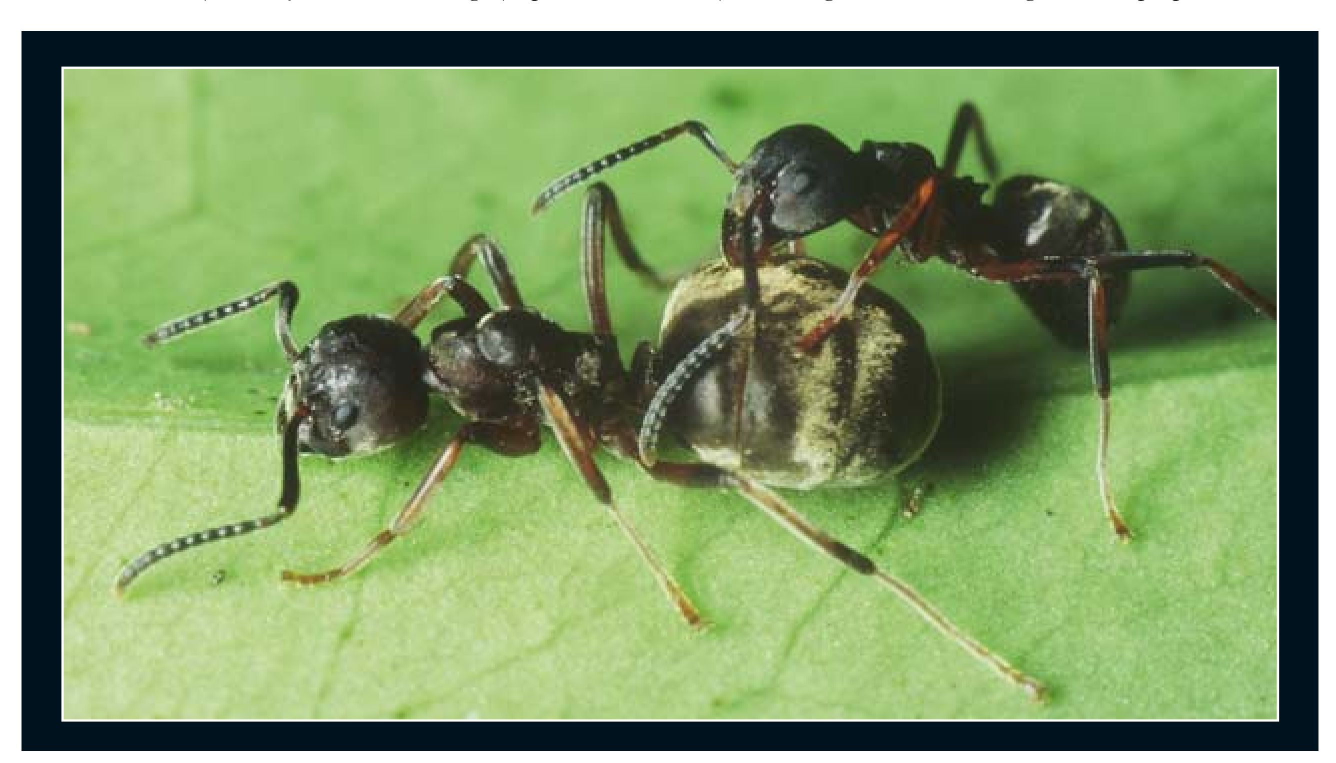
Una alimentación exclusiva de melaza requiere un espacio vital que ofrezca durante todo el año nuevos sitios de pasto donde poder llevar al «ganado». Solo los bosques tropicales, siempre húmedos, presentan las condiciones adecuadas: una escasa diferencia entre estaciones y una extraordinaria diversidad de especies vegetales. Los árboles frondosos de nuestra latitud florecen y brotan en primavera, dan los frutos en verano y otoño, y después pierden las hojas. En cambio, casi todas las especies de árboles o lianas de los bosques tropicales, que se cuentan por millares, presentan un ciclo propio, el cual además puede variar de un año a otro. La selva representa, por tanto, un mosaico dinámico y en constante cambio en lo que refiere a posibles lugares donde hallar comida, algo que la comunidad de hormigas pastoras sabe aprovechar. Con sus peculiares movimientos en busca de alimento, las hormigas se han adaptado de modo impresionante a las singularidades ecológicas de la pluviselva, en especial, a la enorme diversidad de plantas y a su crecimiento condicionado por el clima. La selva constituye, por así decirlo, el nicho ecológico de esta fascinante comunidad simbiótica.



Distintas especies de hormigas dolicoderinas han adoptado un modo de vida nómada. Cada una de ellas se ha especializado en un tipo de «rebaño». Pero sus nidos no son fijos, sino móviles, y están formados por grupos de obreras amontonadas, igual que los enjambres de abejas.

Cuando en nuestras latitudes las plantas terminan la foliación y con ello disminuye el contenido de aminoácidos de su jugo nutritivo, los insectos chupadores solucionan el problema a su manera. Los pulgones primaverales sin alas, que se alimentan de hojas y brotes nuevos de plantas leñosas, producen una nueva generación, esta vez alada. En verano, estos animales se trasladan volando, sin la ayuda de las hormigas, a plantas tiernas, y luego, en otoño, dan lugar a una nueva generación alada que realiza la puesta de los huevos en los árboles. A causa de las variaciones estacionales, resulta imposible una simbiosis permanente con las hormigas, por lo que el nomadismo no puede desarrollarse. Algo parecido sucede en las selvas tropicales de las zonas monzónicas de Asia, donde las hormigas se desprenden de sus pulgones en la estación seca.

A las hormigas pastoras de la inmensa selva tropical se les plantea un reto distinto: hallar cada vez un nuevo sitio de pasto apropiado para su ganado y mostrarlo a los miembros de la comunidad. A menudo las hormigas dejan unas huellas olfativas que les servirán para rehacer su camino de vuelta. Según los estudios, los insectos se desplazan hasta el extremo de las ramas y depositan allí cochinillas a modo de prueba, que intentan absorber la savia. Si no lo consiguen, o lo hacen con dificultad, las hormigas las retiran del lugar. Pero si proporcionan una



Las nuevas comunidades de hormigas pastoras se establecen del mismo modo que las de las abejas melíferas. La comunidad y su «rebaño» se divide en dos partes, una dirigida por la reina joven y la otra por la vieja. La reina (en la imagen, de la especie tailandesa *Dolichoderus erectilobus*) carece de alas incluso de joven, igual que la trabajadora.

MARTIN DILL



Se conocen solo dos tipos de hormigas no pastoras **que se llevan su «dote» de pulgones a la nueva colonia, como el género *Acropyga*, una hormiga subterránea. Las reinas jóvenes que abandonan el nido toman un pulgón con las pinzas de la mandíbula (este tipo de pulgón succiona sustancias de las raíces) para fundar una nueva colonia. Esta conducta se ha captado en la imagen, correspondiente a una reina alada de *Acropyga*, de entre 10 y 20 millones de años de antigüedad, conservada en ámbar en la República Dominicana.**

SVEN TRÄNKNER, POR CORTESÍA DE MARTIN DILL

buena melaza, las pastoras reclutan portadoras de cochinillas y se establece pronto un nuevo sitio donde alimentarse. Gracias a esta estrategia, las pastoras obreras crean con rapidez un sistema de caminos y lugares de alimentación, que se urde como una red cada vez más amplia sobre la vegetación.

CON LA CRÍA Y EL PULGÓN A CUESTAS

Como ya hemos señalado, con su modo de vida nómada las hormigas pastoras han renunciado a la construcción de una morada duradera. Los nidos de *Dolichoderus cuspidatus* no representan una construcción, sino una estructura muy bien organizada: se compone de una masa laberíntica de hormigas obreras que, en su interior, protegen a una gran cantidad de pulgones y a la reina. Esta forma de nidificación la conocemos solo en las hormigas legionarias y en nuestra recién descubierta cultivadora de hongos.

Los nidos de las hormigas pastoras, que alcanzan el tamaño de una pelota de fútbol, se forman en cualquier parte: entre ramas y hojas en la copa de los árboles, sobre hojas secas en el suelo o suspendidos en huecos de la pared o de las raíces. Si los nuevos sitios de pasto se hallan alejados del nido antiguo, la población entera desmonta sus «tiendas» y se traslada con las crías y los pulgones a un lugar cercano. Todo sucede de una manera tan efectiva y ordenada que el traslado se realiza en pocas horas.

El modo de vida nómada de estas hormigas también exige otras estrategias para fundar nuevas poblaciones y conservar la simbiosis. En sus parientes dolicoderinas no nómadas, las reinas jóvenes y aladas abandonan el nido, realizan el vuelo nupcial y, tras haber copulado con machos que también han abandonado el nido, establecen una nueva colonia en un sitio protegido. Para ello crían, de sus primeros huevos, una pequeña cantidad de obreras, alimentadas con una secreción glandular y huevos masticados. A continuación, las jóvenes obreras buscan nuevos compañeros pulgones para «ordeñar», que pueden ser de la misma especie que los de la generación anterior o no. Los pulgones simbióticos se reproducen de forma distinta a las hormigas. Las cochinillas, por ejemplo, dejan que a sus larvas, minúsculas y sin alas, se las lleve el viento y que, con un poco de suerte, las encuentren y las adopten nuevas hormigas.

En cambio, las hormigas pastoras nómadas actúan de forma distinta: desde la fundación de la nueva colonia no se separan nunca de sus cochinillas. Las dos partes están estrechamente unidas; una no puede sobrevivir sin la otra. Si, a modo experimental, se separan las cochinillas, estas vagan en busca de sus compañeras hasta que, finalmente, mueren sin haber sido adoptadas por otras hormigas.

Las reinas de las hormigas pastoras tampoco establecen por sí solas una nueva colonia. Han reducido sus alas —en este sentido se parecen a las obreras— y no se desplazan volando para formar un nuevo nido. En lugar de ello, una colonia madre con una reina joven y otra vieja se divide en dos partes, que a continuación emprenden caminos separados. En ese caso los pulgones también se reparten: la transmisión inmediata de los mismos permite la perduración de los dos elementos de la simbiosis.

Hasta ahora solo se conocía una conducta similar, una estrategia intermedia entre las dos descritas, en dos otros grupos de hormigas. En tales casos, cada reina se lleva consigo un pulgón antes del vuelo nupcial.

Enseguida nos planteamos si la simbiosis que por primera vez observábamos entre las hormigas dolicoderinas y *Malaicoccus* constituía tan solo una extravagante curiosidad dentro de su familia. Suponíamos que ese modo de vida tan especializado era el resultado de un largo proceso evolutivo y, en consecuencia, esperábamos identificar formas análogas, todavía existentes o ya desaparecidas. Procedimos así con tres vías de acción: consultamos la bibliografía sobre hormigas y cochinillas, examinamos grupos de hormigas de morfología semejante y recorrimos en todas direcciones los bosques de Asia tropical en busca de otras hormigas pastoras.

INDICIOS EN MUESTRAS DE MUSEO

Las indagaciones que realizamos dieron su fruto. Sabemos ahora que existe un mundo simbiótico entre las hormigas pastoras que nos era desconocido. En total se han descrito 11 géneros de pulgones que se asocian con 36 especies de hormigas. Todos pertenecen a la familia de cochinillas Pseudococcidae, pero, a causa de su estrecha simbiosis con las hormigas, no se parecen a la típica cochinilla.

En cuanto a la forma de vida nómada, hemos identificado 15 especies de hormigas pastoras, todas ellas del género *Dolichoderus*. (Una especie que esté muy extendida puede asociarse, según la región, con distintas cochinillas; de ahí la desigualdad numérica.) En las muestras disecadas del museo, algunas de las cuales databan del siglo XIX, varios ejemplares todavía sostenían pulgones entre sus mandíbulas. Todas las características corporales y de comportamiento permiten concluir que la evolución hacia el nomadismo se produjo solo una vez y que su éxito condujo a una diversificación de especies con este modo de vida. Hoy en día, las comunidades simbióticas de hormigas pastoras se distribuyen en una vasta región geográfica del sudeste asiático y sus archipiélagos, donde sin duda también se originaron.

Las distintas especies de hormigas pastoras no se diferencian demasiado en su forma corporal, comportamiento básico o adaptaciones ecológicas, ni siquiera cuando los animales viven en el mismo territorio. En el mejor de los casos, algunas están especializadas en los bosques de montaña o se distinguen por sus períodos de actividad o por el tamaño de su comunidad. Y todas las especies investigadas hasta ahora muestran los elementos esenciales del nomadismo. Pero un examen detallado ha revelado un sorprendente abanico de conductas, que se hallan adaptadas a los pulgones. Un ejemplo lo constituye el modo de transporte, en el que se ha producido una evolución ligada a la forma y comportamiento del pulgón.

Contrariamente a las hormigas pastoras, los géneros de cochinillas presentan una enorme diversidad de formas corporales; en consecuencia, también son apresadas y transportadas de modos distintos. Los géneros supuestamente más primitivos —*Archeomyrmococcus* (literalmente, «cochinilla antigua de hormiga») y *Promyrmococcus* («cochinilla primitiva de hormiga»)— se asemejan sobre todo a sus parientes cocoideos. Poseen un vello tupido y largo en todo el cuerpo, y por el abdomen segregan una pequeña cantidad de ceruminosa, sustancia típica de este grupo de pulgones. Sus hormigas compañeras los asen con las mandíbulas de cualquier modo, según les parece.

¿Dejarse llevar...

Las hormigas pastoras siempre llevan a sus socios pulgones a nuevos sitios de pasto. La mayoría de estas especies de cochinillas han desarrollado alguna estructura auxiliar especial o comportamiento que facilita la tarea. Pero el primitivo y peludo pulgón *Archeomyrmococcus* no posee tal estructura. Su hormiga (*Dolichoderus furcifer*) lo agarra como quiere (*arriba*). Las hembras adultas del pulgón *Malaicoccus* son muy grandes y en la parte delantera de su cabeza sobresale una suerte de asa reforzada. Gracias a ella, su hormiga (aquí *Dolichoderus cuspidatus*) la puede sujetar (*centro*). Otras hembras de pulgón, como las del género *Bolbococcus* de Borneo, poseen una prolongación estrecha de la parte posterior del cuerpo, que utilizan a modo de gancho de sujeción. El perspicaz pulgón acerca esa parte a la cabeza de la hormiga (*Dolichoderus kinabaluensis*) y se agarra del cuello (*abajo*).







MARTIN DILL

...o montarse en ella?

Algunas especies de pulgones utilizan a su hormiga como animal de montar, tal y como hace la hembra rojiza del *Hippeococcus* en Java con su hormiga dolicoderina *Dolichoderus gibbifer* (*arriba*). En Borneo, la larva amarilla de un pulgón *Doryphorococcus* se sitúa bajo la pata delantera de su hormiga para desplazarse con ella y, por consiguiente, casi no se la reconoce (*abajo*). Un ejemplar adulto rojo oscuro se agarra fuerte a la parte inferior de la cabeza de su portadora (*Dolichoderus magnipastor*).





ULRICH MASCHWITZ (*arriba*); MARTIN DILL (*abajo*)

Esta primitiva vellosidad y la capacidad de segregar cera se ha ido perdiendo de forma gradual en los otros géneros. En lugar de esos rasgos, su cuerpo ha desarrollado estructuras para el transporte, con las que las hormigas agarran a las cochinillas hembra. El género *Malaicoccus* presenta una cabeza que facilita la sujeción, ya que se halla reforzada con una gruesa cutícula externa y está separada del resto del cuerpo. Otros géneros de pulgones suelen exhibir prolongaciones más estrechas y reforzadas en la parte posterior del cuerpo que sirven como elemento de agarre. Ello mejora el transporte de la pareja simbiótica y la protege de heridas.

PULGONES CON INICIATIVA PROPIA

Cabe mencionar también una segunda tendencia evolutiva. Como ya se ha descrito en *Malaicoccus,* las cochinillas participan de manera activa en su transporte: ante una molestia abandonan por iniciativa propia el sitio de alimentación para buscar contacto con sus hormigas y después subirse encima de ellas. Al mismo tiempo, las trabajadoras las sujetan con la mandíbula. En otros géneros de pulgones, esta iniciativa es todavía más pronunciada y los pulgones montan habitualmente sobre las hormigas para moverse hacia un nuevo destino, a menudo hacia distintos sitios.

La variante más peculiar de este tipo de desplazamiento es el «transporte con las patas». En tal caso, solo una observación atenta revela que las hormigas llevan pulgones. Estos se arrastran hasta colocarse encima de las extremidades de las hormigas y se ocultan para ser transportados en la parte interior del muslo de las obreras. De este modo se reduce el riesgo de heridas y de caídas o deslizamientos desde el dorso de la hormiga.

Cuando dos organismos con capacidades distintas, pero a la vez complementarias —como ocurre con la comunidad de hormigas pastoras y cochinillas—, cooperan y con el tiempo establecen una interacción estrecha, los expertos hablan de coevolución. Esta se produce de manera innovadora y eficaz cuando existe una adaptación mutua entre las dos partes, sin separaciones transitorias ni la necesidad de asociación con otras especies. Ello explicaría que las hormigas pastoras y las cochinillas hayan desarrollado las cualidades y capacidades de su simbiosis de un modo tan armónico y efectivo.

Lamentablemente, la singularidad del nicho ecológico de las hormigas pastoras y sus compañeras (los bosques tropicales perennifolios del sudeste asiático) será su perdición. Los organismos que, al igual que ellas, se hayan especializado en la biodiversidad de ese ecosistema están condenados a desaparecer tan pronto como este se altere o se destruya. De hecho, en los últimos 30 años, las zonas más importantes de la península malaya han sido taladas y transformadas en monocultivos de palma de aceite. Incluso en la isla de Borneo, el centro evolutivo de nuestras hormigas pastoras, la destrucción de los bosques ha avanzado de forma vertiginosa en los últimos años. El cínico comentario que aparece en los rótulos de los propietarios de las plantaciones proclama: «Hacemos más verde el planeta». En este verde desierto creado por el hombre, la supervivencia de las hormigas nómadas y especialistas en selvas tropicales se halla amenazada.

PARA SABER MÁS

Ameisen. Die Entdeckung einer faszinierenden Welt. B. Hölldobler y E. O. Wilson. Birkhäuser, Basilea, 1995.

Herdsmen ants and their mealybug partners. M. Dill, D. J. Williams, U. Maschwitz en *Abhandlungen der Senckenbergschen Naturforschenden Gesellschaft Frankfurt am Main*, vol. 557, págs. 1-373, Stuttgart, 2002.

The superorganism. The beauty, elegance and strangeness of insect societies. B. Hölldobler y E. O. Wilson. W. W. Norton & Co., Nueva York, 2009.





JOHN HENDRIX

Steven M. Rowe es profesor de medicina, pulmonología pediátrica, fisiología y biofísica de la Universidad de Alabama en Birmingham.

J. P. Clancy es catedrático de medicina pulmonar pediátrica en el Hospital Infantil de Cincinnati y en la Universidad de Cincinnati.

Eric J. Sorscher es catedrático de medicina y catedrático de fisiología y biofísica en la Universidad de Alabama en Birmingham.

MEDICINA

Una bocanada de aire fresco

El conocimiento de la biología básica de la fibrosis quística ha preparado el terreno para el desarrollo de nuevos tratamientos

Steven M. Rowe, J. P. Clancy y Eric J. Sorscher

En 1989, cuando se descubrió el gen defectuoso que provoca la fibrosis quística, una grave enfermedad hereditaria que afecta principalmente a niños de ascendencia europea, se tuvo la impresión de que pronto llegaría la tan esperada cura. Después de todo, los análisis realizados en numerosos laboratorios demostraban que suministrar a los pacientes copias normales del gen les capacitaría para sintetizar la proteína correcta especificada por el gen. De tener éxito, esa proeza supondría un gran avance a la hora de devolver la salud a las decenas de miles de personas que sufren fibrosis quística en todo el mundo y que suelen fallecer antes de cumplir los 30 años. (Hoy la mitad de los pacientes viven hasta casi los 40 años; algunos incluso más.) Solo era cuestión de ver si la ciencia conseguiría insertar el gen sano en los tejidos adecuados del paciente para liberarle para siempre de la enfermedad.

Esa tarea resultó ser mucho más complicada de lo que nadie había imaginado. Aunque mediante ingeniería genética se logró crear virus que introducían copias del gen correcto en las células de los pacientes, los virus no realizaban bien su cometido. A finales de la década de los noventa del siglo xx, ciertas complicaciones inesperadas hicieron cada vez más patente la necesidad de hallar otra estrategia para tratar la causa fundamental de la fibrosis quística.

Mientras tanto, los biólogos celulares y sus colaboradores asumieron la larga y desafiante tarea de determinar con exactitud el aspecto de la proteína normal, su funcionamiento y los defectos que daban lugar a los síntomas de la fibrosis quística. Ello conllevó el estudio de la estructura tridimensional de la proteína con un nivel de detalle cada vez mayor, así como de las distintas circunstancias en que la proteína aberrante dejaba de realizar sus funciones celulares. En lugar de crear proteínas normales mediante la sustitución del gen anómalo por otro eficaz (la estrategia de la terapia génica), los biólogos se centraron en un objetivo distinto: descubrir un medicamento que permitiese a la proteína defectuosa trabajar mejor. El éxito de esa búsqueda supondría una vida más larga y saludable para las personas que padecen fibrosis quística.

Las investigaciones con este enfoque, que avanzan de forma paulatina pero constante, están dando sus frutos. Varios compuestos nuevos se hallan en las etapas finales de los ensayos que determinarán su posible aplicación terapéutica; uno de ellos está resultando especialmente prometedor para ciertos pacientes. De tener éxito, sería el primer medicamento que trata la causa primaria de la fibrosis quística, en lugar de aliviar los síntomas. Pero aquí no acaba todo. Los estudios preliminares indican que los nuevos tratamientos podrían funcionar también contra otras enfermedades más frecuentes, como la bronquitis, la sinusitis crónica y la pancreatitis, entre otras.

UN PROBLEMA CON LA SAL

Al descubrimiento de estos medicamentos se llegó después de esfuerzos perseverantes destinados a comprender la biología básica de la fibrosis quística. Desde hace tiempo se sabe que la enfermedad se debe a la incapacidad de ciertos tejidos del organismo para transportar sal (cloruro sódico) a través de las membranas que rodean las células. En estos tejidos, las células excretan el cloro de la sal para ayudar a mantener el equilibrio entre el líquido interior y el ambiente acuoso exterior. A medida que los iones cloruro se acumulan fuera de la célula, se produce la difusión de moléculas de agua hacia el exterior de la membrana. Cuando la célula termina de construir estos diminutos canales de cloruro, los inserta en la membrana, donde cada proteína forma un pasadizo que comunica ambos lados de la célula.

El gen que en 1989 fue identificado como el causante de la fibrosis quística codifica una de estas proteínas: el «regulador de la conductancia transmembranal de la fibrosis quística», o CFTR. La versión normal de esta molécula está compuesta por una secuencia de unos 1500 aminoácidos que se pliegan de una forma complicada y elegante para dar lugar a una serie de bucles y láminas que se retuercen o se insertan, y crean así distintas subsecciones. El flujo de moléculas de agua provocado por la salida de los iones cloruro ayuda a movilizar el moco que recubre las superficies de las vías respiratorias del organismo, además de los conductos que se hallan en los intestinos, el páncreas y el hígado. El canal CFTR transporta también otros iones, como el bicarbonato.

EN SÍNTESIS

La fibrosis quística es una grave enfermedad hereditaria que conlleva la acumulación de un espeso moco en determinados órganos del cuerpo, lo que reduce la capacidad para digerir alimentos o respirar.

Cuando se descubrió el gen causante de la fibrosis quística en 1989, se pensó en la posible curación de la enfermedad, largo tiempo esperada, en forma de terapia génica.

Hubo contratiempos. Pero en la actualidad, una estrategia nueva y distinta está a punto de proporcionar los primeros fármacos que tratan las causas fundamentales de la enfermedad.

Es probable que la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. empiece a considerar este año la aprobación de un medicamento basado en las últimas investigaciones.

Rutas patológicas

Para sobrevivir, las células ajustan constantemente su medio interno, por ejemplo, mediante el transporte activo de iones cloruro hacia el exterior a través de una proteína de membrana: el canal de cloruro funcional (CFTR). Las mutaciones en el gen que codifica este canal pueden dar lugar a la fibrosis quística.

Canal de cloruro defectuoso

Las mutaciones en el gen de la fibrosis quística provocan la enfermedad de distintas formas: la formación de canales CFTR que se hallan bloqueados permanentemente (*a*), truncados (*b*) o plegados de forma incorrecta (*c*). Como resultado, se produce un moco muy espeso que retiene a las bacterias en el lugar (con lo que aumenta el riesgo de infección). El moco obstruye las vías respiratorias de menor diámetro e impide la normal oxigenación de la sangre.

Acumulación de moco espeso

Moco fluido

a CFTR bloqueado

b CFTR truncado

c CFTR plegado de forma incorrecta

Molécula de agua

Ion cloruro

CFTR

VX-770

Canal de cloruro normal

A medida que los iones cloruro se acumulan en el exterior de la célula, las moléculas de agua se difunden desde dentro hacia fuera de la misma, a través de la membrana. El líquido hidrata el moco que recubre la superficie de las células en los pulmones, los intestinos y otros órganos. El moco atrapa contaminantes y bacterias que, de esta manera, pueden ser expulsados del organismo.

Tratamiento prometedor

Un fármaco experimental, VX-770, podría aliviar la enfermedad en algunos de los pacientes. El compuesto abre el canal CFTR en aquellos individuos que presentan canales de cloruro atascados en su conformación cerrada. Por otro lado, se están desarrollando medicamentos para resolver los problemas causados por proteínas CFTR truncadas o plegadas de forma incorrecta.

AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO

En ello reside el origen del problema. La mutación de un gen hace que el organismo carezca de un canal CFTR adecuado. Como resultado, las personas con fibrosis quística producen un moco muy pegajoso y espeso que obstaculiza multitud de procesos fisiológicos. En los pulmones, el moco presenta aspecto de gel y dificulta la difusión del oxígeno hacia los sacos alveolares. Ello hace que el simple acto de respirar, tal y como lo describe uno de los jóvenes pacientes, sea como «intentar respirar con las manos de alguien sobre tu cara». Además, la acumulación de moco viscoso se convierte en un caldo de cultivo ideal para bacterias dañinas, a menudo *Pseudomonas aeruginosa*, que provocan graves infecciones. En el páncreas, las secreciones densas e inmóviles impiden el tránsito de las enzimas digestivas a través de diversos conductos hacia los intestinos, lo que origina una mala digestión. Como consecuencia, las personas con fibrosis quística suelen presentar desnutrición o un peso corporal reducido. Por otro lado, la bilis se queda atrapada en el hígado, de modo que las grasas no se procesan correctamente. La obstrucción de los intestinos provoca estreñimiento y, en ocasiones, un bloqueo completo del tracto gastrointestinal que pone en peligro la vida del paciente.

Antes de la llegada de los antibióticos para tratar las infecciones recurrentes de los pulmones y del descubrimiento de una mejor terapia nutricional, la mayoría de los niños con fibrosis quística fallecían durante el primer año de vida. En las últimas décadas, los avances realizados en medicina y en los tratamientos

paliativos han prolongado sustancialmente la vida de los pacientes. Algunas de las estrategias pueden parecer agresivas para los no iniciados: a los padres o cuidadores se les enseña a hacer vibrar o a dar golpes en el pecho de los niños para ayudar a mover las espesas secreciones de los pulmones y eliminar los taponamientos causados por el moco. Se han creado algunos medicamentos que despejan las vías respiratorias, combaten la infección o fluidifican las secreciones de las vías respiratorias. Ciertos suplementos vitamínicos o enzimáticos ayudan al proceso digestivo. Como resultado de estas y otras medidas, hoy en día la mitad de los pacientes con fibrosis quística viven hasta los 37 años o más. Sin embargo, ninguno de estos tratamientos va dirigido contra la causa primaria de la enfermedad: el flujo insuficiente de cloruro y de otros iones hacia el exterior de las células.

TRES TIPOS DE FALLOS

El primer paso para dar con un fármaco que restableciera, al menos en parte, la función normal de un canal de cloruro consistía en conocer mejor, a nivel microscópico, los detalles de la alteración. Los genetistas han analizado muestras de ADN de pacientes con fibrosis quística de todo el mundo: hasta la fecha, han descubierto más de 1600 mutaciones en el gen *CFTR* que dan lugar a una enfermedad grave. Los efectos deletéreos sobre la proteína CFTR resultante pueden dividirse en varios grupos. En tres de los mejor estudiados se producen los siguientes fallos: el canal nunca llega a ocupar su lugar en la membrana celular; se sintetiza un canal truncado (y las instrucciones para fabricarlo se degradan rápidamente), o se sintetiza un canal de longitud normal pero que no puede abrirse o transportar iones cloruro o de otro tipo. Un fármaco diseñado para reparar uno de esos defectos podría dejar por resolver los otros dos. Para ayudar a la totalidad de pacientes con fibrosis quística tal vez se tengan que desarrollar distintos medicamentos, cada uno centrado en la mutación concreta que provoca la enfermedad.

La mutación genética más frecuente es la que da lugar a la ausencia total de canales de cloruro en la superficie celular. Se debe a la eliminación de uno de los 1500 aminoácidos que componen la proteína. Como el aminoácido que falta es la fenilalanina (que se designa mediante la letra «F») y esta ocupa la posición 508 de la cadena, la mutación recibe el nombre de F508del.

La mutación F508del provoca la enfermedad de una manera peculiar, a primera vista. A pesar de la mutación, la célula sintetiza los canales de cloruro, que se hallan equipados para transportar una cantidad reducida de iones cloruro. Sin embargo, el sistema de control de calidad molecular de la célula impide que lo hagan. La célula posee varios cientos de proteínas ayudantes y de enzimas que trasladan las moléculas incipientes de CFTR a través de la célula, inspeccionan la forma en que se van plegando y las ayudan a insertarse en la membrana celular. Los defectos de plegamiento, incluso aquellos sin importancia aparente, como la ausencia del aminoácido F508, se detectan rápidamente, lo que lleva a la destrucción inmediata de la proteína aberrante por parte de la célula. Como resultado, el canal de cloruro parcialmente funcional nunca alcanza la membrana celular.

Como F508del es la causa más frecuente de la fibrosis quística, numerosos laboratorios de todo el mundo (incluido el nuestro) están tratando de localizar los puntos de control celular exactos en los que la molécula CFTR anómala no consigue «pasar el examen» y se envía a la «papelera de reciclaje». El objetivo consiste en descubrir compuestos que alivien la enfermedad al ayudar a la proteína a plegarse correctamente. De lograrse, se evitaría su destrucción sin interferir en el reconocimiento y eliminación de otras cadenas de aminoácidos defectuosas existentes en la célula.

Saber ajustar los sistemas de control de calidad de la célula conllevaría otras ventajas, además del tratamiento de la fibrosis quística. Varias enfermedades crónicas (como las alteraciones en el metabolismo del colesterol o algunas enfermedades pulmonares, entre ellas, la deficiencia de alfa-1-antitripsina) se producen por un plegamiento anómalo de las proteínas. Cada vez hay más indicios de que la verdadera causa de ciertas dolencias no es el mal funcionamiento de la proteína *per se*, sino la predisposición de los mecanismos de control de calidad para degradar la molécula aberrante o para convertirla en un amasijo enmarañado. No es difícil imaginar que, de evitarse su destrucción, algunas de las proteínas mutantes con ligeros defectos de plegamiento retendrían una parte significativa de su función y podrían realizar la tarea a la que estaban encomendadas. Por tanto, las terapias centradas en el mecanismo de control de calidad podrían proporcionar valiosos conocimientos sobre la biología y el tratamiento de una amplia gama de enfermedades.

Las mutaciones que dan lugar a canales CFTR inusualmente cortos representan alrededor del 10 por ciento de los casos de fibrosis quística en todo el mundo. Una de ellas, conocida como W1282X, contribuye al 40 por ciento de los casos de fibrosis quística en pacientes israelíes. La proteína acaba truncada porque el gen contiene instrucciones equivocadas; estas indican a la maquinaria de síntesis proteica que deje de añadir aminoácidos a la molécula creciente de proteína a partir de la posición 1282 de la cadena, lugar donde suele co-

PASO A PASO

Progreso constante

Las personas con fibrosis quística han visto aumentar su esperanza de vida gracias a los nuevos medicamentos y estrategias de cuidados paliativos. También los fármacos que tratan la causa biológica subyacente a la enfermedad podrían resultar de enorme ayuda.

1994 Un medicamento, la dornasa alfa, mejora la función pulmonar al descomponer el espeso moco de los pulmones

1997 La administración sistemática del antibiótico tobramicina en los pulmones mediante aerosol reduce las infecciones

2002 La Fundación Fibrosis Quística pone en marcha un programa de mejora de la calidad que estandariza el tratamiento de los pacientes estadounidenses

2009 El chequeo obligatorio de los recién nacidos estadounidenses para detectar la fibrosis quística permite identificarla y tratarla de manera temprana

JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*); FUENTE: REGISTRO DE PACIENTES DE LA FUNDACIÓN FIBROSIS QUÍSTICA: MEMORIA ANUAL 2009

locarse el aminoácido triptófano (designado con la letra «W»). Este tipo de instrucciones, los «codones sin sentido», resultan cruciales en la síntesis proteica normal, siempre y cuando se ubiquen en la posición correcta. Sin embargo, en este caso el proceso de síntesis se detiene de forma prematura. Además, las instrucciones intermedias que intervienen en el proceso (el ARN mensajero) se identifican también como aberrantes y se destruyen. De este modo, aunque se pudiese evitar de alguna manera la señal de parada, no se formaría una cantidad suficiente de la proteína funcional. Por tanto, los fármacos contra W128X tendrían que abordar dos problemas en lugar de uno.

El ajuste de los sistemas de control de calidad celulares conllevaría otras ventajas, además del tratamiento de la fibrosis quística, como la reparación de defectos en el metabolismo del colesterol y otras enfermedades

El último grupo de mutaciones que consideramos aquí reduce la capacidad del canal para abrirse y es responsable del cinco por ciento de los casos de fibrosis quística en todo el mundo. La mutación provoca que la entrada al canal se quede atascada en su configuración cerrada, con lo que disminuye la eficacia del transporte de iones cloruro al medio extracelular. Una de las mutaciones que actúa de esta forma (G551D) provoca síntomas de especial gravedad. Aunque por norma general cada grupo de defectos genéticos exigiría un tratamiento específico, se ha demostrado que los compuestos diseñados para mantener abierta la entrada de un canal CFTR mutante ayudarían a los pacientes sin esta mutación. Tomemos el caso de un fármaco que hiciera posible el desplazamiento de una pequeña cantidad de CFTR F508del hasta un lugar apropiado en la membrana celular. Un segundo fármaco que mantuviese abierta la entrada del canal permitiría que esta versión un tanto lenta del canal dejara salir más iones cloruro hacia el exterior de la célula.

MEDICAMENTOS PROMETEDORES

El siguiente paso en el largo proceso del desarrollo de fármacos consistía en buscar compuestos que aliviaran los efectos de mutaciones específicas en el gen *CFTR*. Parecía lógico comenzar con F508del, debido a su elevada prevalencia en pacientes con fibrosis quística y a que la proteína resultante retiene cierta funcionalidad. Si se lograra que CFTR F508del eludiera su degradación prematura, la proteína podría manifestar una actividad parcial y mejorar la función de los pulmones sin más intervenciones.

Aún no se sabe con exactitud cómo se produce el plegamiento anómalo de la proteína CFTR F508del y cómo la maquinaria de control de calidad de la célula detecta ese defecto. Sin embargo, resulta bastante sencillo determinar si un compuesto concreto mitigará los efectos de un error de plegamiento en las células humanas. Mediante la introducción de moléculas fluorescentes en el interior de una célula, se pueden medir pequeños cambios en la concentración de cloruro o de otros iones que se desplazan a través de la membrana celular. Se puede deducir que el canal CFTR dañado ha recuperado parte de su función cuando los iones traspasan la membrana después de la exposición a un medicamento potencialmente terapéutico. Si los iones no consiguen atravesarla, se sigue buscando un compuesto más activo. Mediante un proceso automatizado y computerizado de cribado de fármacos se pueden analizar millones de sustancias en un periodo de tiempo relativamente corto.

La compañía biotecnológica Vertex Pharmaceuticals identificó un compuesto, VX-809, que a pesar de ofrecer unos resultados preliminares esperanzadores, no mejoraba de forma significativa la función pulmonar de los pacientes estudiados. Otra compañía, PTC Therapeutics, está realizando ensayos clínicos con ataluren, un medicamento contra las mutaciones, menos frecuentes, que dan lugar a una versión truncada de CFTR. El fármaco hace que la maquinaria de síntesis proteica siga leyendo la secuencia tras encontrarse con alguna señal de *stop* situada de forma incorrecta; evita así que la proteína del canal de cloro acabe truncada. La sustancia también se está ensayando contra otros trastornos hereditarios en los que intervienen codones de terminación aberrantes, como en el síndrome de Hurler y la distrofia muscular de Duchenne.

Los mejores resultados se han obtenido en las estrategias para contrarrestar la mutación G551D. Tras ensayar 228.000 compuestos en células con canales de cloruro que apenas se abrían, un grupo de investigadores de Vertex descubrió un fármaco, VX-770, que activaba de forma selectiva el interruptor energético del canal CFTR e incrementaba su función hasta el 50 por ciento del valor normal. Dado el éxito de estos experimentos, el compuesto es ahora objeto de análisis exhaustivos. En los primeros ensayos, se observó que los pacientes con la mutación G551D mejoraban la capacidad respiratoria al cabo de algunas semanas de tratamiento. Los efectos beneficiosos se mantuvieron durante todo el estudio, que duró un año. Además, los individuos tratados fueron hospitalizados con menos frecuencia y experimentaron un aumento medio de peso de entre 3 y 4 kilogramos. Uno de nosotros (Rowe) fue el primer médico de Estados Unidos que administró VX-770 a un paciente. En algún momento del presente año, Vertex planea solicitar a la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos el permiso para comercializar el medicamento. El empleo de VX-770 junto con otras sustancias también está dando resultados prometedores en los ensayos clínicos. (La Universidad de Alabama en Birmingham es uno de los lugares donde se llevan a cabo ensayos clínicos con fármacos desarrollados por PTC Therapeutics y Vertex; Rowe y Clancy han asesorado a ambas compañías en el diseño del estudio.)

Esos resultados clínicos son innovadores, y el descubrimiento de medicamentos que tratan la causa fundamental de la fibrosis quística da validez a las décadas de investigación sobre su biología básica y a la financiación de ese trabajo por los Institutos Nacionales de Salud y la Fundación Fibrosis Quística. Aunque se están llevando a cabo otros ensayos clínicos con un grupo de pacientes más numeroso para determinar la seguridad y eficacia a largo plazo de los nuevos compuestos, existe un creciente optimismo de que algún día lograremos por fin tratar las causas subyacentes a esta compleja enfermedad.

PARA SABER MÁS

Cystic fibrosis. Steven M. Rowe, Stacey Miller y Eric J. Sorscher en *New England Journal of Medicine*, vol. 352, págs. 1992-2001; 12 de mayo de 2005. **www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMra043184**

Managing cystic fibrosis: Strategies that increase life expectancy and improve quality of life. Malena Cohen-Cymberknoh, David Shoseyov y Eitan Kerem en *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 183, n.º 11, págs. 1463-1471, junio de 2011.

GEOLOGÍA

El bosque de los cristales gigantes

En una mina del norte de México, un sistema de cuevas da cobijo a los cristales de yeso de mayor tamaño de la Tierra

Giovanni Badino y Paolo Forti

En el desierto de Chihuahua, en el norte de México, se halla Naica, un pueblo que creció en torno a una de las minas de plata más importantes del mundo. La mina alcanzó fama internacional en 1910, cuando las labores de excavación descubrieron una nueva cavidad a 130 metros por debajo de la cota de altura del acceso a la mina (1385 metros por encima del nivel del mar). Se trataba de la cueva de las Espadas. Contenía los cristales de yeso más grandes que se hubieran visto jamás, de hasta dos metros de longitud. Por desgracia, la cueva fue expoliada casi por completo para que sus cristales pudieran verse en los museos de mineralogía de más renombre.

Tras la guerra, la actividad minera se intensificó; se excavó hasta alcanzar el acuífero subyacente. En la actualidad, enormes bombas drenan el fondo de la mina y extraen el agua caliente (a 54 grados Celsius) a razón de más de un metro cúbico por segundo para que las labores mineras prosigan a más de 800 metros bajo la superficie.

En el año 2000, a 290 metros de profundidad, se descubrieron otras tres cuevas. En esencia, se trataba de enormes geodas que albergaban formaciones de yeso sorprendentes. En la mayor de todas, la cueva de los Cristales, se halló un bosque de cristales de dimensiones descomunales. En aquella ocasión, las autoridades que gestionaban la mina bloquearon de inmediato el acceso a la cueva para evitar el expolio.

Entre 2001 y 2005 se llevaron a cabo expediciones esporádicas a las cuevas, pero pronto se llegó a la conclusión de que la adversidad de sus condiciones ambientales nunca permitiría una exploración o documentación exhaustivas ni un estudio científico. Las cuevas de Naica y, en particular, la cueva de los Cristales, presentan una temperatura muy elevada (46 grados Celsius) y una humedad relativa de casi el 100 por cien. En tales condiciones se inhibe el enfriamiento corporal por transpiración, la superficie del cuerpo se calienta hasta llegar a sufrir riesgo de quemaduras y, en poco tiempo, sobreviene la muerte por hipertermia.

La hostilidad ambiental puede cuantificarse mediante el índice humidex, que determina la temperatura percibida y se calcula en función de la temperatura externa y la humedad. El organismo comienza a sufrir trastornos cuando este índice rebasa el valor 35; uno superior a 55 ya supone un peligro de muerte inminente. En el interior de las cuevas, el índice oscila entre 95 y 105. En cada una de nuestras expediciones hemos aprendido mucho acerca del cuerpo humano y su capacidad de resistencia. Ahora, podemos considerarnos afortunados de haber salido siempre con vida.



SALVO MENCIÓN EXPRESA, TODAS LAS FOTOGRAFÍAS DE ESTE ARTÍCULO SON CORTESÍA DE LA VENTA Y C/PRODUCCIONES

EN SÍNTESIS

En 1910, en una mina próxima a Naica, un pueblo del desierto mexicano de Chihuahua, se descubrió una cueva (la cueva de las Espadas) con cristales de yeso de hasta dos metros de longitud.

En el año 2000 se hallaron otras tres cuevas en la misma mina. Una de ellas contenía cristales de hasta once metros; probablemente, los mayores del mundo.

Entre 2001 y 2005 se intentó explorar las cuevas, pero sus condiciones extremas (46 grados Celsius y un 100 por cien de humedad) exigían equipos especiales de protección.

Gracias al Proyecto Naica, fundado en 2006, se han llevado a cabo numerosas expediciones que han permitido documentar y analizar estas cuevas de cristal.

Giovanni Badino, profesor de física en la Universidad de Turín, se ha dedicado durante años a la astronomía de neutrinos. En la actualidad estudia principalmente los fenómenos de las microatmósferas de las cuevas.





Paolo Forti es profesor de espeleología en la Universidad de Bolonia. Ha explorado y estudiado cuevas en 70 países, sobre todo desde el punto de vista mineralógico.

Con el fin de investigar y rodar documentales sobre dichos ambientes, en 2006 se creó el Proyecto Naica, fundado por la empresa Peñoles, propietaria de la mina; la distribuidora C/Producciones, de ciudad de México, y la asociación italiana de exploración geográfica La Venta. La primera acción del proyecto fue posibilitar un seguimiento médico constante de exploradores e investigadores. Más tarde, se estudió en detalle el problema de la protección. Se fabricaron trajes y equipamientos especiales que facilitasen la respiración y permitiesen una estancia prolongada en el interior de la cueva.

Al Proyecto Naica se han sumado especialistas en varias disciplinas. El equipo de investigación actual, compuesto por científicos procedentes de una veintena de universidades y organismos de investigación de los dos continentes, se encuentra coordinado por el departamento de ciencias de la Tierra de la Universidad de Bolonia. El proyecto perseguía tres objetivos. El primero consistía en la exploración de las cavidades naturales interconectadas de la mina. La tarea se completó entre 2006 y 2010, después de cartografiar con detalle la cueva de los Cristales y su tapiz cristalino. El segundo correspondía a la realización de documentales, finalidad que culminó en 2010 con el rodaje de un documental científico, la grabación de algunas de las expediciones y miles de fotografías de alta resolución. Por último, el estudio científico de las cuevas se encuentra todavía en curso, aunque muchas de las metas iniciales ya se han alcanzado.

Con todo, el objetivo principal consistía en responder de manera exhaustiva a la clase de preguntas que asaltan a cualquiera que contemple las cuevas de Naica y sus monumentales cristales de yeso, aunque solo sea en una fotografía o en la televisión. ¿Cuándo y por qué se formaron semejantes cristales? ¿Cuánto tardaron en crecer? ¿Qué les deparará el futuro? ¿Han condicionado los microorganismos su evolución? En el presente artículo esbozaremos las respuestas obtenidas por nuestro equipo de investigación.

CRISTALES GIGANTESCOS

La naturaleza nos obsequia a menudo con cristales de tamaño reducido. Basta con pensar en todas las geodas de cuarzo amatista que se exponen en cualquier mercado o muestra de minerales. Los cristales gigantes, en cambio, resultan mucho menos frecuentes. Su formación requiere un entorno extremadamente estable y poco saturado durante miles de años, condiciones muy difíciles de reunir. ¿Por qué ha ocurrido algo así en Naica? La estabilidad térmica se logró gracias a un gran acuífero termal que nunca brotó hacia el exterior, por lo que sus aguas se mantuvieron a temperatura casi constante. Durante más de 250.000 años, la variación ha sido ínfima: de 58 a unos 54 grados Celsius. La temperatura solo comenzó a disminuir en 1980, cuando las labores mineras provocaron un descenso artificial del nivel freático (en la actualidad ha descendido unos 700 metros) y comenzaron a drenar las cuevas.



Condiciones extremas: **Las fotografías muestran el interior de la cueva de los Cristales, descubierta en el año 2000 a 290 metros de profundidad en el desierto de Chihuahua, en México.**

EXPLORADORES SUBTERRÁNEOS

Asociación La Venta

La asociación italiana La Venta elabora y gestiona proyectos de exploración de carácter geográfico, con un interés particular por el mundo subterráneo. A lo largo de sus veinte años de investigación en parajes extraordinarios, entre selvas, glaciares, montañas y laberintos bajo tierra, ha desarrollado nuevas técnicas de investigación y divulgación. Su principal objetivo consiste en apoyar la conservación de tales paisajes y la concienciación de las poblaciones vecinas.

Sus investigadores realizan expediciones espeleológicas geográficas y coordinan estudios multidisciplinares en zonas kársticas para comprender sus aspectos arqueológicos, históricos, antropológicos y físicos. Las cuevas se consideran elementos integrados en un territorio, como si se tratara de su cara oculta. La Venta (www.laventa.it) es conocida en todo el mundo tanto por sus publicaciones y documentales como por sus trabajos de consultoría y colaboraciones con Gobiernos e instituciones culturales y científicas.

Sin embargo, y aunque es indispensable, la estabilidad térmica no garantiza por sí misma el crecimiento de cristales gigantes. Se necesita además que el grado de saturación se mantenga constante y muy bajo. Tales condiciones se han alcanzado gracias a la diferencia entre la solubilidad del yeso (sulfato de calcio hidratado) y la de la anhidrita (sulfato de calcio anhidro) a temperatura constante. Por debajo de los 59 grados, la solubilidad de la anhidrita es ligeramente superior a la del yeso. Por lo tanto, la anhidrita de las rocas de Naica se disuelve al mismo tiempo que el yeso precipita. La escasa diferencia entre ambas solubilidades supone un grado de sobresaturación muy bajo; en consecuencia, se forman pocos cristales, pero gigantescos.

Para calcular el tiempo que tardaron los cristales en alcanzar sus dimensiones actuales se emplearon dos métodos. El primero consistió en una técnica radiométrica basada en la proporción de los isótopos de uranio y torio, cuya fiabilidad hoy se considera probada. Se dataron muestras de la parte más interna de los cristales: las edades estimadas para los mayores yesos de la cueva de los Cristales oscilaban entre 200.000 y 300.000 años. A continuación, se procedió a refinar el resultado a partir de las mediciones de la velocidad actual de cristalización del yeso en las zonas del interior de la montaña por las que aún circulan aguas termales (unos 300 metros por debajo de las cuevas). Para ello, se construyó un dispositivo que reproducía las condiciones en las que se formaron los cristales y en su interior se introdujeron láminas de yeso para facilitar la deposición. El dispositivo



SUPERVIVENCIA

El traje térmico Tolomea

Las condiciones ambientales de las cuevas de Naica (46 grados centígrados y una humedad de casi el 100 por cien) imposibilitan la termorregulación corporal, ya que la temperatura del aire supera el valor al que tiene lugar la muerte celular. Al poco tiempo, sobrevendría la muerte por efecto de un golpe de calor. La exploración requirió el diseño de un sistema que permitiera estancias prolongadas en las que poder realizar observaciones científicas. Se confeccionó un traje especial dividido en varias capas: la exterior protege de la condensación y la radiación; la central consta de una serie de fragmentos de hielo distribuidos por la superficie del cuerpo que, al fundirse, absorben el calor ambiental y corporal.

Tolomea es el nombre de la penúltima zona del noveno círculo del Infierno de Dante. Para permitir la refrigeración del cuerpo e impedir que el aire condense agua en los pulmones, lo que los abrasaría, resulta indispensable el uso de un respiradero de aire enfriado y deshumificado. El exceso de aire se redirige directamente a los ojos para evitar el contacto con el aire de la cueva. El sistema ha permitido estancias de más de una hora en unas condiciones ambientales que, en ausencia de protección, provocarían la muerte al cabo de pocos minutos.

se colocó bajo una salida de agua termal ubicada a 590 metros bajo la superficie, a una temperatura superior a los 51 grados y con una humedad relativa del 100 por cien.

Aunque no resultó fácil en absoluto, el experimento dio resultado: al cabo de seis meses habían crecido pequeños cristales de yeso idénticos a los cristales gigantes naturales. Las medidas continuaron durante tres años, al cabo de los cuales se obtuvo una edad de 250.000 años para los cristales más grandes, un valor congruente con el obtenido a partir de los datos radiométricos.

ALGO MÁS QUE YESO GIGANTE

Aunque las cuevas de Naica gozan de fama mundial por el tamaño descomunal de sus cristales, esconden también otros tesoros. En su interior pueden encontrarse otros cristales de yeso mucho más modestos que, a pesar de ser desconocidos y no tan espectaculares, presentan un gran interés estético y científico. Entre ellos destacan, debido a su unicidad, las delicadas *velas*, fibras de yeso muy delgadas que crecieron en pocos días por capilaridad conforme las aguas termales abandonaban las cuevas, hace menos de treinta años. No menos interesantes resultan los *ganchos de yeso*, formas retorcidas y fusiformes cuyo crecimiento responde a un fenómeno de condensación rápida que tuvo lugar en cuanto el agua desapareció de las cuevas.

Con todo, lo más sorprendente quizá sea que, a pesar de hallarse tapizadas de cristales de yeso, las cuevas albergan una enorme variedad de minerales: óxidos, hidróxidos, sulfatos, silicatos, fosfatos y cloruros. De momento, se han descubierto más de cuarenta; muchos de ellos, rarezas que no se habían encontrado antes en ninguna otra cueva. Uno de ellos, un silicato de aluminio y magnesio, podría representar un mineral hasta ahora desconocido para la ciencia. Algunos se formaron antes de que los grandes cristales de yeso comenzaran a gestarse; sobre todo, depósitos de oxihidróxidos de hierro, magnesio, plomo y zinc. Estos continuaron creciendo a medida que se formaban los cristales gigantes, de modo que quedaron atrapados en su interior y dieron lugar a numerosas inclusiones sólidas.

La etapa de mayor variedad mineralógica comenzó cuando el agua ya había abandonado las cuevas a causa de la explotación minera. De hecho, más de la mitad de los minerales secundarios se han formado durante los últimos treinta años. Ese excepcional «florecimiento» cristalino se debió a que los mecanismos activos de formación mineral resultan más numerosos y eficientes en condiciones aéreas que en ambientes anegados, como el que caracterizó a las cuevas de Naica hasta hace poco.

HUELLAS DEL PASADO

A simple vista, los cristales de yeso de Naica parecen puros y perfectos. Sin embargo, al microscopio se observan numerosas cavidades, que, en ocasiones, contienen sustancias líquidas o sólidas. Dichas «imperfecciones» poseen un gran valor, ya que aportan gran cantidad de información sobre las condiciones y el clima local que prevalecieron durante la formación de los cristales.

Con frecuencia, los cristales contienen pequeñas inclusiones fluidas: pequeñas cantidades del agua que nutría los cristales y que quedó atrapada en su interior conforme estos crecían. En los yesos de Naica las inclusiones fluidas son comunes y, a menudo, presentan dimensiones inusuales. En muchos casos se trata de inclusiones bifásicas (de agua y gas) que otorgan a los cristales el aspecto de un nivel de burbuja. Su estudio estadístico ha permitido obtener la salinidad y la temperatura del agua en el momento de formación, gracias a lo cual se ha logrado reconstruir la evolución temporal del quimismo de las aguas termales a lo largo del proceso de cristalización.

Pero, además, en los cristales de Naica se observan granos de polen en buen estado de conservación. Se trata de algo insólito, ya que el agua en la que se formaron los cristales debía recorrer varias decenas de kilómetros bajo tierra hasta alcanzar una profundidad de más de 1000 metros, para después volver a ascender y penetrar en las cuevas de Naica. Hasta ahora

se han extraído y reconocido 60 muestras, las cuales han permitido deducir el clima reinante en Naica hace miles de años, cuando el hombre aún no habitaba la región de Chihuahua. La presencia de polen de *Quercus garryana*, *Lithocarpus densiflora*, *Taxus*, *Plantago*, *Poaceae* y *Lycopodium* pone de manifiesto que, en aquel entonces, el clima del lugar no era desértico, como hoy, sino mucho más húmedo y frío; similar al de San Francisco, 1500 kilómetros más al norte.

MICROORGANISMOS Y MICROMETEOROLOGÍA

Resultaba evidente que muchas de las inclusiones sólidas halladas en los yesos correspondían a estructuras biológicas fosilizadas; sin embargo, en su interior no había quedado ningún resto de materia orgánica. Por otro lado, sí albergábamos la esperanza de hallar vivos algunos de aquellos microorganismos en el interior de las inclusiones fluidas atrapadas en los mismos cristales que contenían las estructuras fosilizadas. En 2007 se tomaron muestras de agua de las inclusiones fluidas, las cuales fueron cultivadas en condiciones asépticas (aeróbicas y anaeróbicas) y a temperatura controlada para tratar de obtener nueva biomasa. Al desconocer cómo debíamos cultivar los supuestos organismos para mantenerlos con vida, el experimento resultó largo y complejo. Sin embargo, concluyó con éxito: al cabo de tres años había suficiente cantidad de materia orgánica como para realizar un análisis de ADN y especificar qué tipo de microorganismos extremófilos habitaban en las profundidades de Naica hace decenas de miles de años, mientras crecían los grandes cristales de yeso.

Aunque la investigación no ha concluido, sabemos ya que los cristales gigantes contienen microorganismos hasta ahora desconocidos para la ciencia, si bien guardan similitudes más o menos evidentes con otros organismos extremófilos hallados en otras cuevas volcánicas, géiseres o surgencias termales. La posibilidad de hallar vida extremófila en el interior de los cristales ha estimulado a un investigador de la NASA a participar en el proyecto.



La cueva de las Velas debe su nombre a la presencia de múltiples y delgadísimas fibras de yeso que se forman por capilaridad.

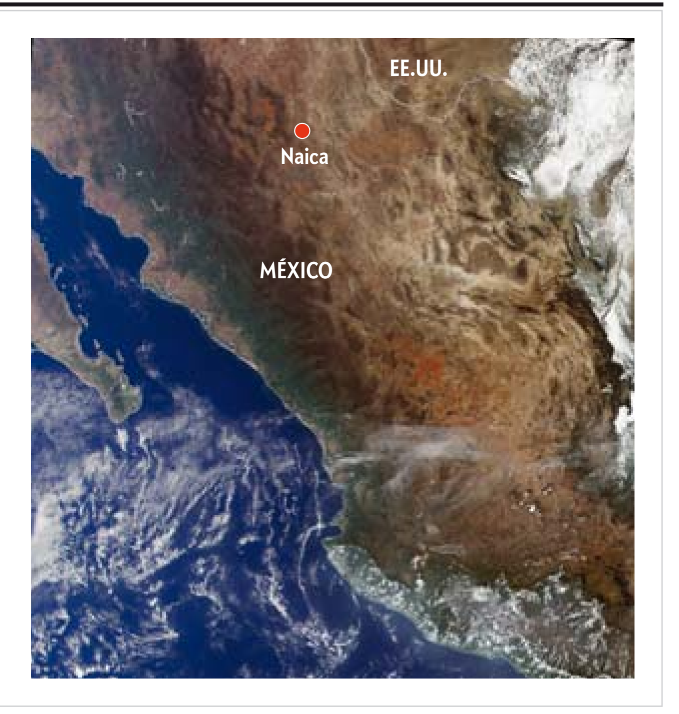
Las labores mineras que descubrieron tan valioso tesoro cristalino, que hoy garantizan su protección, han convertido las cuevas en un lugar más accesible, pero alejado de su estado natural (a 160 metros bajo el agua y a 54 grados centígrados). Por tanto, el estudio de la evolución climática de las cuevas resulta de gran interés para analizar su «decadencia» hacia un nuevo estado y, si fuera necesario, reducir los daños en los cristales y acondicionarlas para visitantes e investigadores. En el departamento de física de la Universidad de Turín se lleva a cabo un

LOCALIZACIÓN DE LAS CUEVAS

La región de Naica

El estado de Chihuahua, en el noreste de México, limita con EE.UU. y presenta una superficie de 250.000 kilómetros cuadrados. Se trata de un territorio árido y plano, situado a una altura de entre 1000 y 2000 metros, lo que suaviza el clima. Hacia el oeste, la llanura asciende y moldea los mayores relieves de la región; luego desciende de nuevo hasta llegar al océano en forma de profundos valles. Estos forman la Barranca del Cobre, una de las estructuras geológicas más imponentes del planeta.

En la zona habitaban los nativos tarahumara, a quienes se debe la selección genética de los perros chihuahua. Una de las principales carreteras entre México y EE.UU. atraviesa el estado de Chihuahua de sur a norte. Al sur de la capital del estado, a más de 1400 kilómetros de Ciudad de México, la carretera se compone de fragmentos rectilíneos que atraviesan zonas semidesérticas hasta llegar a la ciudad de Delicias. Desde allí, por una modesta carretera de cuarenta kilómetros rumbo al sudeste, se accede al pueblo minero de Naica. El topónimo podría tener origen tarahumara; significaría «lugar sombreado» (*nai*, «lugar», y *ka*, «sombra»), debido, quizás, a la sombra proyectada por la única sierra que se eleva en el desierto circundante.



CORTESÍA DE LA NASA/RETO STOCKLI, BRIAN MONTGOMERY Y ROBERT SIMMON; BASADO EN DATOS DE MODIS SCIENCE TEAM (*mapa*)



Formaciones nuevas y viejas: Minerales de neoformación observados a 150 metros de profundidad (*arriba*), entrada a la mina de Naica (*abajo*) y la cueva de los Cristales (*derecha*).





estudio de la evolución del microambiente de las cuevas y su relación con el exterior.

Nuestro estudio ha puesto de manifiesto que, en estos momentos, las cuevas se enfrían a un ritmo de 0,52 grados al año. Esto se debe, por un lado, a la comunicación con la mina por medio del corredor de acceso; por otro, al contacto térmico a través de la roca con las galerías mineras próximas a la parte occidental. Por desgracia, el enfriamiento conlleva problemas de condensación sobre los cristales que, en principio, podrían comprometer la integridad de su estructura. La débil circulación del aire indica que debe existir cierta conexión con zonas topográficamente más bajas que la mina. Por otro lado, se ha estudiado tanto su respuesta a impulsos térmicos como la evolución temporal de las variaciones de temperatura y humedad en cada punto, sobre todo con la profundidad. Sin duda, el resultado es emocionante: la cueva de los Cristales representa tan solo un pequeño fragmento visible de una serie de cavidades mucho mayores que se extienden por encima, entre la roca suprayacente y la cercana cueva Ojo de la Reina. La exploración de dichas áreas forma parte de los objetivos de las investigaciones futuras.

EL FUTURO DE LAS CUEVAS

Las cuevas de Naica no sobrevivirán muchos años si no se lleva a cabo una intervención drástica. En primer lugar, se encuentran sometidas a un constante riesgo de expolio. El valor comercial de los grandes cristales induce a los mineros a extraer piezas enteras, o al menos fragmentos, para venderlos después en el mercado internacional de minerales. La empresa Peñoles, propietaria de la mina, hace lo posible por impedir este tipo de saqueo que, por otro lado, resulta inevitable.

El enfriamiento continuo y considerablemente rápido de las cuevas representa un peligro aún mayor. La disminución pau-

LOS CRISTALES

Un récord para celebrar

Como parte de nuestro proyecto, elaboramos un inventario en el que describimos las características de los cristales hallados en la cueva de los Cristales. Se estudiaron 162 piezas, prácticamente todas. En general, los cristales se orientan hacia el centro de la cavidad, al igual que ocurre en las geodas «normales». La longitud media oscila entre cuatro y seis metros, lo que se corresponde con la altura promedio de la cueva. La dimensión transversal depende de la duración del período de crecimiento, por lo que su distribución presenta cierta uniformidad: entre 30 y 60 centímetros y, en algún caso, más de un metro.

Las dimensiones del cristal de mayor tamaño despiertan un interés especial, ya que con toda probabilidad se trata del mayor del mundo. Cristalizó en posición casi horizontal, en la sección nororiental de la cavidad. Posee una longitud de 11,4 metros, una sección de 80 × 90 centímetros en la base y de 30 × 35 en el extremo final. Fue bautizado con el nombre de «Cristal Cin» [de la expresión que en italiano se emplea para brindar].



latina de la temperatura superficial de los cristales favorece la condensación, un proceso con graves consecuencias. El problema radica en que, además de disolver parcialmente el yeso, el agua condensada deposita concreciones de calcita en la superficie de los cristales y, en consecuencia, estos pierden con rapidez su brillo y transparencia.

Sin embargo, la mayor amenaza radica en el fin de la actividad minera, que con toda probabilidad concluirá pronto, cuando la extracción de plata deje de ser rentable. En cuanto se detengan las grandes bombas emplazadas a 800 metros de profundidad, el agua termal volverá a ascender y, en pocas semanas, habrá alcanzado su nivel original de 130 metros de profundidad: 160 metros por encima de la cueva de los Cristales y 290 metros sobre las demás. En ese momento, la breve ventana temporal que nos había permitido contemplar este monumento geológico se cerrará para siempre. Por ello, los miembros del Proyecto Naica tratan de concluir a tiempo sus estudios científicos y documentales, los cuales recogen imágenes de una maravilla que, tarde o temprano, desaparecerá de nuestra vista. No deben olvidarse los más de 40 artículos científicos publicados o en proceso de publicación en revistas científicas y divulgativas, los centenares de miles de fotografías de alta resolución, los documentales grabados en colaboración con los mejores canales de televisión del mundo, ni la película sobre la exploración de la cueva de los Cristales, que ya ha sido proyectada en los cines mexicanos.

Nos gustaría ir más allá. Querríamos que las generaciones venideras pudieran contemplar también, al menos en parte, estas maravillas naturales aun después de que las aguas termales asciendan. Soñamos con llevar a cabo una operación similar a la efectuada en Abu Simbel, donde se reubicó un templo para evitar su naufragio tras la construcción de la presa de Asuán. Si bien se trata de un objetivo factible desde el punto de vista técnico, se requiere voluntad política. Así lo esperamos, pues supondría la única manera de continuar disfrutando de las cuevas de Naica y de su monumental bosque de cristal.

PARA SABER MÁS

Giganti di cristallo nelle grotte di Naica. G. Badino. Tintoretto; Treviso, 2008.
Genesis and evolution of the caves in the Naica mine (Chihuahua, México). P. Forti en *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 54, supl. 2, págs. 115-135, mayo de 2010.
The Naica Project: A multidisciplinary study of the largest gypsum crystal of the world. P. Forti y L. Sanna en *Episodes*, vol. 33, n.º 1, págs. 1-10, 2010.
Página web del Proyecto Naica: **naica.com.mx**
Ultraslow growth rates of giant gypsum crystals. A. E. S. van Driessche, J. M. García Ruíz, K. Tsukamoto, L. D. Patiño López y H. Satoh en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, publicado en línea el 12 de septiembre de 2011.

ARQUEOLOGÍA

El guardián de los faraones

Zahi Hawass, célebre arqueólogo y exministro de Antigüedades, habla sobre su papel durante la revolución de Egipto y los meses posteriores

Jeffrey Bartholet

Una noche, durante las semanas previas a la caída del presidente Hosni Mubarak, un grupo de saqueadores invadió los terrenos del Museo de Antigüedades Egipcias de El Cairo (a veces llamado Museo de El Cairo). Al menos uno de ellos se coló en el edificio principal deslizándose por unos cables colgados de un tragaluz. Otros se dedicaron a desvalijar almacenes en conocidos yacimientos arqueológicos. El mundo de la egiptología era presa del pánico.

Al final, los expolios no fueron tan devastadores como algunos temían, y se recuperaron muchos tesoros nacionales. Pero la situación de caos suscitó nuevas críticas y supuso un desgaste emocional para Zahi Hawass, por entonces ministro de Antigüedades.

El propio Hawass, un célebre arqueólogo conocido en Occidente por su imagen de héroe de cine en documentales y programas de televisión como *Chasing Mummies,* ofreció información a veces confusa y contradictoria sobre lo que estaba pasando con las antiguas reliquias bajo su custodia. Algunos críticos le atacaron por formar parte del antiguo régimen. Sus enemigos vieron una oportunidad para deshacerse de él. Hawass dimitió de su cargo a principios de marzo, pero regresó abruptamente unas semanas más tarde. En julio, en una remodelación del Gobierno de transición, fue relegado de su puesto.

Las revueltas crearon interrogantes sobre el nivel de seguridad actual de las antigüedades egipcias. Queda por ver en qué momento los turistas se sentirán lo suficientemente seguros como para volver a surcar el Nilo en grandes grupos. Jeffrey Bartholet, que estuvo en Egipto cubriendo los disturbios de febrero, habló hace poco por teléfono con Hawass para nuestra revista. Lo que sigue corresponde a un extracto de la conversación. [La entrevista se realizó en el mes de mayo, antes de que Zahi Hawass fuera destituido como ministro de antigüedades.]

EN SÍNTESIS

Zahi Hawass, exministro de Antigüedades de Egipto, continúa su trabajo como egiptólogo.

Hawass dedica gran parte de sus esfuerzos a la búsqueda de la tumba de Cleopatra y otros tesoros egipcios.

Además de arqueólogo, es experto en *marketing* y muy avezado en política. Hawass era ya una figura controvertida incluso antes de la revolución.

MIKHAIL GALUSTOV



El antiguo régimen ha desaparecido, pero sigue habiendo mucha incertidumbre. ¿Se está moviendo Egipto en una dirección claramente positiva?
Creo que se está intentando. Se hace todo lo posible para celebrar elecciones parlamentarias y elegir a un nuevo presidente de Egipto.

¿Qué mejoras está observando?
La seguridad está empezando a llegar a las calles. Y la gente está trabajando muy duro por la democracia y la libertad. No creo que los egipcios hayan tenido esta clase de democracia en los últimos 5000 años. Es la primera vez que se practica de verdad. Espero que no lleve mucho tiempo hacerlo bien.

Usted dimitió de su puesto en marzo, y luego regresó. ¿Por qué?
El motivo de mi dimisión fue que en aquel momento había criminales saqueando las antigüedades pero nadie para detenerlos. Por más que yo gritara, nadie podía ayudarme. Al mismo tiempo, estudiantes que necesitaban empleo se pusieron a gritar delante de mi despacho porque querían trabajo ya. Todo ello me quitó las ganas de quedarme. Luego volví porque yo formo parte de las antigüedades, y las antigüedades forman parte de mí.

¿Hubo alguna oferta o sugerencia? ¿Se le ofreció algún tipo de apoyo?
Vi que el Gobierno estaba aportando más seguridad y que me estaba apoyando. El Ejército me respaldaba. Ahora podemos ver los resultados de aquello. La mayoría de los objetos del Museo de El Cairo que fueron saqueados ya están de vuelta. Solo nos faltan 31; el resto (unos 1200 objetos sustraídos de almacenes y cámaras) no son realmente obras maestras.

Cuando la revuelta empezó en Egipto, algunos temieron una repetición de los hechos de Irak, es decir, que los tesoros y el patrimonio de Egipto acabaran saqueados y destruidos.
Mire: ¿quién protegió el Museo de El Cairo? En realidad fueron los jóvenes manifestantes. En Irak se robaron 15.000 objetos del museo. Los egipcios protegieron su museo con sus propios cuerpos. Eso es algo a tener en cuenta.

Cuénteme cómo funciona el mercado negro de antigüedades. ¿Quiénes son los ladrones, quiénes los intermediarios y quiénes los compradores finales?
Después de la revolución, no creo que haya un mercado para nada. Antes de ella, había gente que robaba objetos de Egipto y los sacaba del país. Atrapamos a la mayoría. Yo he traído de vuelta unos 5000 objetos procedentes de todo el mundo a lo largo de los últimos nueve años.

¿Pero cómo funciona? ¿Vienen individuos extranjeros y se ponen a trabajar con redes criminales?
Tiene que comprender que la mayor parte del Egipto moderno está construido sobre el Egipto antiguo. La gente puede llevar a cabo excavaciones ilegales; excavan en sus propios patios traseros para encontrar antigüedades. Pero yo he colocado inspectores de antigüedades en cada puerto y aeropuerto para evitar que la gente saque los objetos del país. He contratado también a guardias preparados para tal fin. Y he mandado construir 47 cámaras de almacenaje.

El gobierno de Hamas en Gaza envió una delegación hace poco para devolver algunas piezas robadas y resultó que los objetos eran falsos. ¿Me puede contar algo sobre aquello?
Encontraron dos estatuas y me las trajeron. Yo descubrí que no eran auténticas y se las devolví. Les di las gracias y les animé a visitar las antigüedades de Egipto cuando quisieran.

¿Qué más se puede hacer a nivel internacional para recuperar los objetos robados desde enero?
Ya hemos recuperado las obras maestras. Pero hace unos días me reuní con alguien de la Interpol y vamos a difundir información sobre cada uno de los objetos por todo el mundo. Sinceramente, pienso que los saqueadores que se llevaron las piezas no eran criminales profesionales. Así que creo que recuperaremos los objetos. Y no saldrán de Egipto.

Usted ha dicho que en estos momentos todavía hay 31 objetos del Museo de El Cairo en paradero desconocido. ¿Cuáles son los más significativos?
El único objeto significativo del museo es una pequeña cabeza de la reina Nefertiti, de unos pocos centímetros de altura.

La estatua de Akenatón ha sido devuelta.
Trajimos de vuelta la estatua de Akenatón que sujeta una estela. Y hemos recuperado la mayoría de los objetos de Tutankamón que habían sido robados.

¿Y dónde estaban? ¿Dónde los encontraron?
Se los llevaron los saqueadores que entraron en el museo la noche del 28 de enero. Hallamos los objetos de Tutankamón porque había alguien trabajando para el departamento de antigüedades que vino a verme y me dijo que había unos saqueadores que querían devolverme esos objetos. Al día siguiente, ese hombre me trajo una bolsa con cuatro objetos.

A lo largo de los años, usted ha llevado a cabo una campaña para obligar a los museos internacionales a devolver objetos egipcios. Tras la revolución y el saqueo, hay gente en Occidente que planteó que los objetos estaban más seguros repartidos por el mundo. El Museo de Historia Natural de Basilea fue el primero en devolver una pieza desde la revolución de enero. ¿Es un objeto importante?
Mucho. Se trata de un relieve del Imperio antiguo, de hace unos 4000 años.

Usted desempeñó un papel en el antiguo Gobierno y ahora forma parte del Gobierno actual. ¿Cuáles son las diferencias ahora, en el trabajo diario de su ministerio y en la forma de gobernar el país?
Usted sabe que yo soy un técnico, no un político. Nunca he militado en ningún partido y he hecho mi trabajo de maravilla.

Pero sí que tuvo una relación de trabajo bastante cercana con la ex primera dama, Suzanne Mubarak. ¿Fue ella una mecenas política importante para el departamento de antigüedades?
No, ella no tenía nada que ver con el trabajo relacionado con las antigüedades. Colaboré con ella para crear el museo infantil en El Cairo. Acabaremos las obras dentro de dos meses. Va a ser el mejor museo infantil de todo Oriente Próximo.

¿Ha estado en contacto con la ex primera dama desde que su marido abandonó el poder?
Ya le he dicho que soy un técnico, no un político. Mi relación con la primera dama consistió simplemente en el proyecto de ese museo. No fue realmente una relación cercana. Mucha gente cree que yo soy del antiguo régimen; mis enemigos lo dicen. Pero no lo soy. Nunca en la vida he sido político.

Aun así, usted debió de sentir algo a nivel personal al ver cómo la detenían.
Eso es algo que hacen los Gobiernos. Yo no puedo interferir en ello. Cada egipcio —y hay 85 millones de ellos— puede estar relacionado de algún modo con el antiguo régimen. Pero cuando hay un nuevo régimen que te gusta, conectas con él.



Zahi Hawass ofrece información sobre los objetos sustraídos del Museo de El Cairo

¿Y los disturbios han interferido con la actividad arqueológica en Egipto?
Las cosas ya empiezan a reactivarse. La mayoría de las expediciones extranjeras han solicitado trabajar en septiembre y octubre. Todos quieren volver.

¿Qué tal va la búsqueda de la tumba de Cleopatra?
¿Sabe?, no hemos excavado [en los últimos meses] debido a la revolución. Pero en septiembre volveré a trabajar en el Valle de los Reyes y también seguiré con la excavación en busca de la tumba de Cleopatra.

¿Qué han encontrado de momento?
Hemos hallado estatuas y monedas de Cleopatra, así como estatuas de reyes [ptolemaicos]. Todos estos descubrimientos son muy importantes.

Cuénteme algo del Valle de los Reyes. ¿Qué está buscando allí?
Estoy buscando la tumba de Ankesenamón, la esposa de Tutankamón. No tengo nada que lo demuestre, pero albergo esperanzas de que suceda algo esta próxima temporada.

Antes mencionó a sus críticos y a sus enemigos. Dígame algo de ellos.
Me enteré [antes de la revolución] de que algunas personas tenían muy mala reputación en el departamento de antigüedades y habían sido acusadas en el pasado de robar antigüedades y cosas así. Y los castigué. Cuando llegó la revolución, ellos tuvieron ocasión de decir cualquier cosa sobre mí. Y empezaron a atacarme. A mí realmente no me importaba; ni les contesté. Pero si miras estos casos, ves que son personas envidiosas que intentaron frenarme, pero no lo consiguieron.

En estos momentos, usted está recurriendo una condena de cárcel de un año por no cancelar el concurso de adjudicación para gestionar una nueva tienda dentro del museo. ¿Qué me puede contar de aquello?
En cuanto cualquier funcionario del Gobierno trata de proteger algo enfrentándose a un civil, el civil te puede llevar a juicio. Cuando el tribunal toma una decisión, no es contra ti personalmente, sino contra tu cargo. Pero como yo soy muy conocido, le dieron mucho bombo.

¿El caso se refiere a la librería del museo?
Había un hombre que tenía una vieja librería y que no nos pagaba. No voy a decir nada de él. Pero yo construí una librería nueva y preciosa, y a este hombre eso no le gustó.

Algunos críticos dicen que su estilo de gobierno es imperioso y que usted es excesivamente ambicioso. Hablan de una línea de ropa que usted lanzó en un momento dado. ¿Qué responde a eso?
La gente no entiende lo de la línea de ropa. En primer lugar, la sesión de fotos [para la ropa] no se hizo en el Museo de El Cairo, como dicen por ahí. Y en segundo lugar, todo el dinero que recibo va a un hospital para niños con cáncer. Estoy muy orgulloso de que la línea de ropa se haya hecho famosa y de que esté ayudando a los niños.

Usted es muy conocido por su sombrero estilo Indiana Jones. ¿Lo lleva para crear una imagen de sí mismo y de Egipto?
Cuando me puse este sombrero, a la gente le encantó, no sé por qué. Es algo que se convirtió en parte de mí. Estoy muy orgulloso de que niños de todo el mundo compren [copias de] este sombrero. El dinero va a parar al museo infantil.

¿Qué le dice a la gente que sostiene que usted es demasiado autoritario?
Si tienes que controlar las antigüedades de Egipto, debes ser muy fuerte a la hora de hacer tu trabajo. Si no lo eres, nunca lo conseguirás. Todo el mundo robaba nuestras antigüedades antes [de que yo ocupara el cargo]. Los directores del departamento no eran tan fuertes anteriormente. Cuando yo hago esto, lo hago por el bien de las antigüedades.

El turismo es vital para la economía egipcia, pero de momento tan solo los visitantes más intrépidos se atreven a navegar por el Nilo. ¿Qué se puede hacer al respecto?
Voy a utilizar descubrimientos y aperturas de museos para atraer de nuevo a los turistas, y al mismo tiempo el Gobierno hará más por mejorar la seguridad de los yacimientos. Entonces la gente podrá volver y disfrutar de la magia y el misterio de Egipto.

Jeffrey Bartholet *fue jefe de la delegación de Washington y redactor jefe del área internacional para* Newsweek.

PARA SABER MÁS

The pharaoh. Ian Parker en la revista *New Yorker*; 16 de noviembre de 2009. **www.newyorker.com/reporting/2009/11/16/091116fa_fact_parker**
Chasing mummies. Programa del History Channel con Hawass en el papel principal: **www.history.com/shows/chasing-mummies**
El blog de Hawass: **www.drhawass.com/blogs/zahi-hawass**

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



El retorno del hombre invisible

Ante la imposibilidad de hacernos transparentes, jugar con la reflexión permite pasar sin ser vistos

Eliminar la opacidad del cuerpo es el sueño dorado de los especialistas en diagnóstico clínico por imágenes. Y también el de quienes desean sustraerse a las miradas de todos. ¿Qué proponer a esos tímidos incorregibles? Ya que, a diferencia de algunos animales marinos, no podemos hacernos transparentes, quizá podamos construir los artilugios adecuados. ¿Tal vez un buen traje mimético? Existe una solución mejor: una capa de invisibilidad.

Hacerse invisible supone un proyecto muy ambicioso, ya que el objetivo requiere no absorber, reflejar ni dispersar luz alguna, condiciones que rara vez se satisfacen. El plexiglás es transparente, pero refleja parte de la luz, pues su índice de refracción difiere bastante de el del aire. Para ver, los animales marinos necesitan absorber luz, por lo que al menos sus ojos resultan visibles (por no hablar del contenido de los intestinos).

Seamos más modestos y empecemos por buscar nuestro capote invisible entre aviones y buques furtivos. Estos no pretenden ser totalmente invisibles; les basta con hurtarse a la detección del radar. Para ello, deben evitar reflejar hacia el aparato las ondas que este emite de manera continua para sondear el cielo. Una primera idea consiste en emplear materiales que reenvíen una cantidad mínima de radiación en el intervalo de frecuencias empleado por el radar. Si bien esta estrategia ha dado algunos frutos, los resultados aún no son del todo satisfactorios.

Reflexión engañosa

Otra solución pasa por evitar que la radiación reflejada por el avión retorne hacia el radar. ¿Cómo controlarla? La onda del radar se refleja en la superficie del avión al igual que un rayo de luz lo hace en un espejo perfecto, con un ángulo de reflexión igual al de incidencia. La radiación no se dispersa en todas direcciones, ya que, a la escala de la longitud de onda empleada por el radar (centimétrica), la superficie de la aeronave no exhibe rugosidades.

La forma geométrica del aparato desempeña aquí un papel esencial. Una geometría curva, como la de una esfera, reenvía la radiación en todas direcciones. Un plano, en cambio, refleja la onda en una única dirección. Una esfera metálica expuesta a la luz del sol siempre nos reenviará algún destello, pero un espejo nos deslumbra solo si su orientación es la adecuada. He aquí por qué los ingenieros militares prefieren las superficies planas



Para reflejar el haz del radar en una dirección distinta de la del emisor, la geometría de los aviones furtivos se compone de superficies planas. También debe evitarse la concurrencia de planos ortogonales, pues, cuando el avión vira, dicha disposición refleja las ondas hacia el radar.



La gran visibilidad nocturna de las señales de tráfico se debe a que estas se encuentran recubiertas por pequeñas partículas esféricas cuya cara interna posterior es reflectante. Las microesferas reenvían la luz en la dirección de la que proviene. Un efecto análogo explica por qué los ojos de los gatos brillan tanto cuando se les ilumina: su retina también es reflectante.

BRUNO VACARO

para sus aviones furtivos. Al igual que un espejo, el avión no reenviará las ondas hacia el radar a menos que alguno de sus planos se oriente de manera perfectamente perpendicular al haz. Por ello, las superficies de los primeros aviones furtivos, como el F-117, eran todas planas. De esta manera resultan casi invisibles... a costa de no pocos quebraderos de cabeza para los ingenieros aeronáuticos.

Pero las superficies planas no resuelven todos los problemas. La deriva o estabilizador vertical del avión y los alerones de cola, horizontales, ocultan una trampa. Esa configuración de dos planos perpendiculares se caracteriza por una propiedad peculiar en lo que respecta a la reflexión de las ondas. Para entenderla mejor, imaginemos primero la esquina de cubo reflectante según se vería desde el interior. En dicha esquina concurren tres planos perpendiculares. Cuando se ilumina una superficie tal, la luz regresa siempre a su punto de origen con independencia de la dirección del haz. De este fenómeno se valen los catadióptricos de las bicicletas y de los vehículos para asegurarse de que, por la noche, serán vistos por cualquier automóvil que se les aproxime. El *Apolo 11* colocó reflectores de ese tipo sobre la Luna para que reenviasen hacia los observatorios terrestres los rayos láser emitidos por estos. Gracias a ello, hoy podemos medir la distancia a nuestro satélite con un error inferior al centímetro.

En el caso de un avión, la deriva y los alerones forman dos planos ortogonales, no tres. Esa combinación retorna el haz del radar cuando el aparato se encuentra de perfil e inclinado, una situación frecuente durante los virajes. Por tanto, un avión furtivo debe evitar las parejas de superficies planas perpendiculares, razón por la que la deriva del F-117 no es vertical, sino que se compone de dos planos inclinados en forma de V.

Sin embargo, eso tampoco torna a los aviones furtivos completamente invisibles. Se han diseñado radares biestáticos, a los que al aparato emisor-receptor se le suma un segundo receptor en un emplazamiento lejano. Así, el eco del radar puede detectarse no solo en la dirección del emisor, sino también en otras. Los radares multiestáticos, con más de dos receptores, funcionan aún mejor.



Para lograr la invisibilidad, una capa cubierta de retrorreflectores reenvía los rayos luminosos en su dirección inicial. Una videocámara filma la escena que se encuentra detrás de la persona y, al mismo tiempo, se proyecta esa filmación sobre la parte delantera. El observador tiene entonces la impresión de que la persona se ha vuelto transparente.

BRUNO VACARO

Capas de retrorreflectores

Vemos, por tanto, que las reflexiones bien dirigidas constituyen la clave de la invisibilidad. Si resulta difícil desaparecer de la vista de los demás es porque a nuestro alrededor abundan los focos luminosos. Iluminados desde todas partes, reenviamos la luz en todas las direcciones. Para pasar desapercibido, una solución consiste en confundirse con el entorno, algo que los camaleones logran de manera natural. Hoy en día se investiga sobre tejidos con la facultad de cambiar de color.

Pero mudar de color no permite un mimetismo total; lo ideal sería volverse transparente. ¿Cómo? Una posibilidad consiste en reproducir delante de la persona que desea desaparecer la imagen exacta de lo que se encuentra detrás de ella. Hace unos años, investigadores de la Universidad de Tokio comenzaron a trabajar en esta idea. En esencia, se basa en una cámara situada detrás de la persona que filma la escena trasera; después, un proyector la reproduce en la parte frontal.

Si la persona viste ropa común, incluso blanca, el procedimiento no funciona: la cantidad de luz reemitida depende de la orientación del tejido, lo que delata con facilidad las partes frontal y lateral. Para solucionarlo, los investigadores japoneses fabricaron una capa recubierta de retrorreflectores minúsculos que reenviaban la luz del proyector en su misma dirección. En vez de pequeñas esquinas de cubo, muy difíciles de tallar, utilizaron «ojos de gato». Estos dispositivos consisten en pequeñas esferas cuya superficie posterior es reflectante. Cada una actúa como una lente y enfoca la luz que recibe en un punto del fondo, donde es reflejada. Después, el mismo efecto de lente reenvía esa luz en la dirección incidente. Eso es lo que ocurre con los ojos de un gato en la oscuridad: de repente, sus ojos aparecen muy brillantes cuando reciben iluminación desde la dirección correcta.

El método desarrollado por los expertos de la Universidad de Tokio se muestra espectacular, si bien aún necesita perfeccionarse para simular la transparencia desde todas las direcciones posibles. Pero quién sabe, quizá los trajes de invisibilidad no tarden en llegar al mercado.

PARA SABER MÁS

Telexistence and retro-reflective projection technology (RPT). S. Tachi en *Proceedings of the 5th Virtual Reality International Conference* (VRIC 2003), págs. 69/1-69/9, 2003.

por Agustín Rayo



Agustín Rayo es profesor asociado de filosofía en el Instituto Tecnológico de Massachusetts. Es especialista en filosofía de las matemáticas y filosofía del lenguaje.

Espejos y reflejos

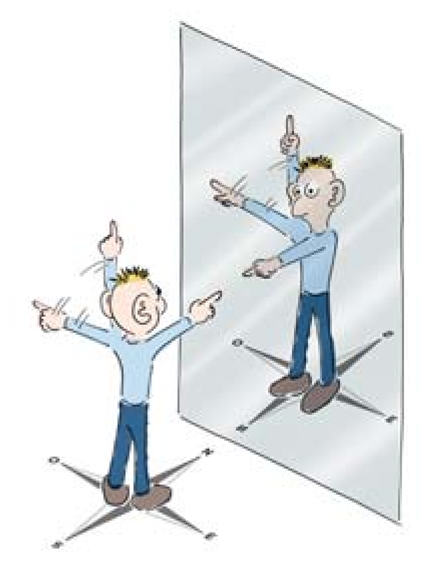
¿Por qué los espejos invierten derecha e izquierda, pero no arriba y abajo?

Supongamos que tiene usted un lunar en la mejilla derecha. Si se sitúa frente a un espejo, su imagen tendrá el lunar en la mejilla izquierda. Como es bien sabido, el espejo ha generado una inversión entre ambos lados. Pero imagine ahora que el lunar se halla en la mitad inferior de su rostro. En tal caso, su imagen especular también exhibirá un lunar en la mitad inferior. El espejo no ha producido ninguna inversión entre arriba y abajo. ¿Cómo se explica esta asimetría? La pregunta se la hizo Martin Gardner en 1967 en su libro *El universo ambidiestro*. La respuesta resulta fascinante.

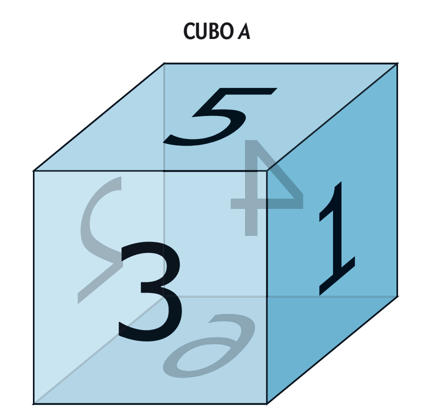
Comencemos con un experimento mental. Imagínese de nuevo frente a un espejo. Este se sitúa perpendicular a la dirección norte-sur y usted se encuentra mirando hacia el norte. Si toma una flecha y la orienta hacia el oeste, la flecha de su reflejo también apuntará hacia el oeste. Si ahora la dirige hacia arriba, la flecha en el espejo apuntará también hacia arriba. Lo mismo sucederá siempre que la flecha se encuentre sobre un plano paralelo a la superficie del espejo. En cambio, si la flecha se orienta en la dirección perpendicular a dicha superficie, la del reflejo apuntará hacia la orientación inversa. Si su flecha se dirige hacia el norte, la del reflejo lo hará hacia el sur.

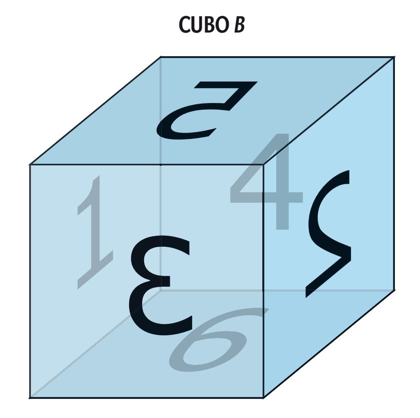
En el experimento anterior hemos empleado un sistema de coordenadas *geocéntricas*: arriba, abajo, norte, sur, este y oeste. A diferencia de las coordenadas *egocéntricas*, como derecha, izquierda, delante y detrás, las coordenadas geocéntricas son independientes de la orientación del sujeto. La lección que podemos extraer es que los espejos no invierten las direcciones geocéntricas paralelas a su superficie, pero sí las perpendiculares.

Lo anterior sugiere que la inversión que realiza un espejo es en realidad una inversión entre delante y detrás. Para verlo, considere la figura 2. Imagine que el cubo *A* se encuentra frente a un espejo y que el cubo *B* es su reflejo. Una manera para transformar el cubo *A* en el *B* es la siguiente. Suponga que el cubo *A* se compone de un material plástico transparente y muy flexible. Realice una pequeña perforación en la cara frontal del cubo, empuje la cara trasera hacia la frontal e introdúzcala en el agujero, como si se tratase de un calcetín al que desea dar la vuelta. Continúe el proceso hasta que todo el cubo haya pasado a través de la perforación y, por último, vuelva a tapar el orificio. El resultado es un cubo idéntico al *B*. En otras palabras, el reflejo del cubo *A* coincide con el resultado de invertir delante y detrás (donde hemos definido las orientaciones «delante» y «detrás» como aquellas que apuntan hacia las caras 1 y 2, respectivamente).



1. ¿Hacia dónde apunta su reflejo? Si el personaje de la figura apunta hacia el oeste o hacia arriba, el reflejo hará lo mismo. Pero si apunta hacia el norte o el sur, el reflejo apuntará en sentido inverso.



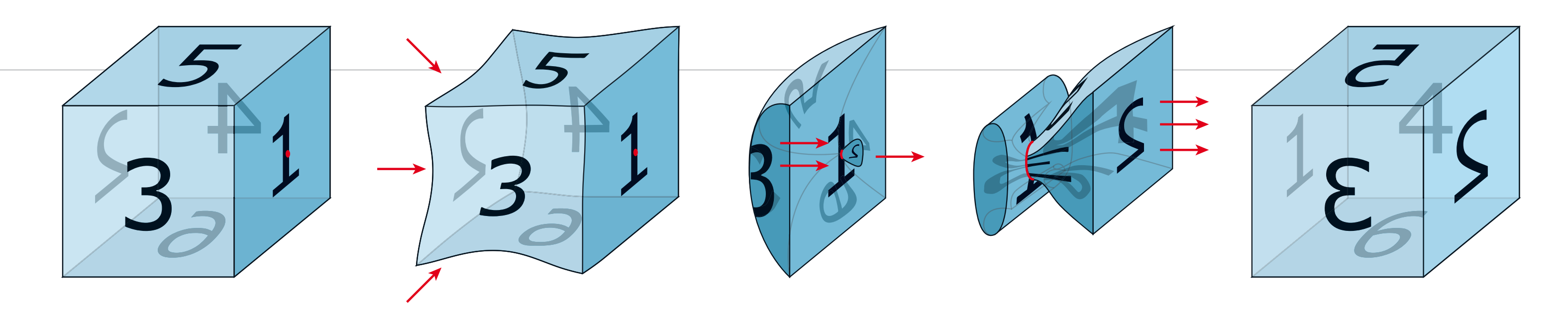


2. Un cubo y su reflejo: **Un cubo (*A*) y su imagen especular (*B*), tal y como esta aparecería en un espejo situado entre los dos cubos. Podemos entender el reflejo como el resultado de cierta traslación de los puntos del cubo a lo largo del eje perpendicular a la superficie del espejo.**

¿Qué sucedería si, en lugar de invertir las partes delantera y trasera, hubiésemos invertido la derecha y la izquierda (3 y 4) o la superior y la inferior (5 y 6)? ¡Hubiéramos terminado también con el cubo *B*! En estos casos, sin embargo, la posición final del cubo habría sido otra. Si hubiéramos invertido derecha e izquierda, por ejemplo, habríamos tenido que rotar el resultado 180 grados en torno al eje arriba-abajo para obtener la orientación original (*véase la figura 4*).

¿Dónde está la asimetría?

Hay un sentido, por tanto, en el que puede decirse que el reflejo de un objeto en un espejo es una inversión entre lados opuestos. Pero, en ese mismo sentido, de-



3. La «transformada especular»: Una manera de visualizar la transformación geométrica que da lugar a un reflejo consiste en imaginar un cubo fabricado con un material muy flexible. Si realizamos una pequeña perforación en uno de sus lados y hacemos pasar todo el objeto a través de ella, la figura resultante será idéntica a la imagen especular del cubo.

beríamos admitir que los espejos también invierten arriba y abajo, puesto que ambas inversiones producen el mismo resultado, salvo un cambio de orientación.

¿Qué queda entonces de la asimetría con la que comenzamos? ¿Cómo es que su reflejo tiene un lunar en la mejilla izquierda si usted lo tiene en la derecha, pero que su reflejo no tiene un lunar en la parte superior del rostro si usted lo tiene en la parte inferior? La respuesta no tiene que ver con ninguna asimetría en el funcionamiento de los espejos, sino con una asimetría entre nuestras nociones de izquierda y derecha, por un lado, y arriba y abajo, por otro. Izquierda y derecha son conceptos egocéntricos; arriba y abajo son conceptos geocéntricos. La mejor manera de entenderlo consiste en construir versiones egocéntricas de arriba y abajo.

Comencemos por examinar la noción de izquierda. ¿Cómo podemos definirla? Se trata de un concepto egocéntrico, por lo que solo puede especificarse desde el punto de vista del sujeto. He aquí una propuesta. Identifiquemos primero dos asimetrías intrínsecas al individuo: la diferencia entre el lado superior (donde se encuentra la cabeza) y el inferior (donde se hallan los pies), y la distinción entre el lado frontal (el de la cara) y el dorsal (el de la nuca). Llamemos *dirección capitular* a la que va de los pies a la cabeza y *dirección frontal* a la que va de la nuca a la cara (supondremos que ambas son perpendiculares entre sí).

Situemos ahora un reloj en un plano perpendicular a la dirección frontal, con la esfera mirando hacia el frente y el minutero apuntando en sentido capitular. Definiremos *izquierda* como la orientación del minutero justo un cuarto de hora después.

¿Qué ocurre con el reflejo? Para definir su noción de izquierda, nuestro reflejo podría emplear un procedimiento análogo al que hemos descrito. Pero aquí resulta crucial observar que, cuando afirmamos que «nuestra imagen especular tiene el lunar en *su* mejilla izquierda», estamos suponiendo implícitamente que el reloj empleado por nuestro reflejo para definirla es un reloj común y corriente, *no* la imagen especular de nuestro reloj. De lo contrario, tendríamos que decir que nuestro reflejo también tiene el lunar en su mejilla derecha.

Inversión delante-detrás

Inversión arriba-abajo

Inversión izquierda-derecha

4. Inversiones equivalentes: La inversión entre dos lados cualesquiera da siempre como resultado el mismo cubo: solo cambia la orientación del objeto. Si todas las inversiones resultan equivalentes, ¿qué queda de la asimetría entre derecha e izquierda con la que comenzamos?

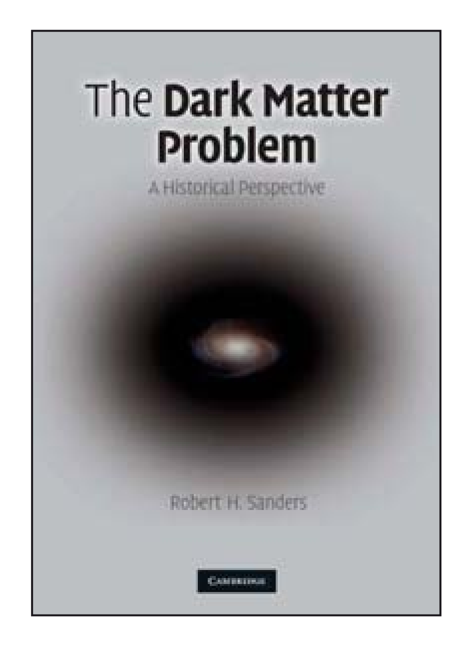
Diseñemos ahora un procedimiento análogo para construir las versiones egocéntricas de las nociones de arriba y abajo. Las denominaré *arriba** y *abajo**. Como antes, comencemos por identificar una asimetría intrínseca al sujeto. Debido al lugar que ocupa el corazón, los humanos tenemos un pulmón más pequeño que otro. Llamemos *dirección cardíaca* a la que va del pulmón mayor al menor, y definamos la dirección frontal de la misma manera que antes (de nuevo, supondremos que ambas son perpendiculares). Situemos un reloj en el plano perpendicular a la dirección frontal, con la esfera orientada hacia el frente y con el minutero apuntando en sentido cardíaco. Definiremos *abajo** como el sentido hacia el que apuntará el minutero quince minutos más tarde (*arriba** será el sentido opuesto).

Ahora podemos hacer la siguiente observación. Al igual que los espejos invierten izquierda y derecha, invierten también arriba* y abajo*. La razón es muy sencilla: si nuestro reflejo siguiese pasos análogos a los anteriores para definir *sus* nociones de arriba* y abajo* (guiado por la posición de su corazón y, de nuevo, empleando un reloj normal en lugar de la imagen especular del nuestro), su concepto de arriba* coincidiría con el nuestro de abajo* (así como con la noción geocéntrica de abajo), y viceversa.

No es sorprendente que, en la práctica, utilicemos los conceptos geocéntricos de arriba y abajo en lugar de sus análogos egocéntricos. Arriba* y abajo* se basan en una asimetría intrínseca que no resulta obvia a simple vista: la ubicación del corazón. En cambio, la diferencia entre cielo y tierra que se utiliza para definir arriba y abajo se muestra mucho más evidente. En el caso de izquierda y derecha, sucede lo contrario: las asimetrías intrínsecas en las que se basan estos conceptos egocéntricos resultan obvias y desempeñan una función muy importante en nuestras vidas.

PARA SABER MÁS

Además del libro de Gardner, recomiendo el artículo **Why do mirrors reverse right/left but not up/down**, de Ned Block, publicado en *Journal of Philosophy*, vol. 61, 1974.



THE DARK MATTER PROBLEM. A HISTORICAL PERSPECTIVE,
por Robert H. Sanders. Cambridge University Press. Cambridge, 2010.

Materia obscura

Raíces y perspectivas

De acuerdo con la tesis vigente, la materia obscura constituye un componente sustancial del universo entero. Sin ella no habría estrellas, ni galaxias ni otras macroestructuras. Muy pocos físicos cuestionan que el contenido en materia del universo esté dominado por materia obscura, unas partículas hipotéticas que interaccionan con la materia ordinaria (protones, neutrones y electrones) a través, sobre todo, de la fuerza de la gravedad. Aunque invisible para los métodos de detección directa actuales, la materia obscura permite explicar observaciones astronómicas muy dispares. Robert H. Sanders recorre aquí el desarrollo de una teoría que, tras 75 años de existencia controvertida, se ha convertido en un concepto central de la cosmología y astronomía extragalácticas. El autor da un paso al frente y describe también una teoría alternativa: la dinámica newtoniana modificada (MOND, de *modified newtonian dynamics*).

A comienzos del decenio de los años treinta del siglo xx, Fritz Zwicky emprendió un estudio cinemático sistemático de un cúmulo de galaxias. Subrayó que, para poder dar cuenta del ligamen gravitatorio del cúmulo en su integridad, la masa total tenía que ser cientos de veces superior a la masa observada de las estrellas de las galaxias. Un año antes, Jan Oort, al observar el movimiento de las estrellas por encima del plano galáctico, concluyó que debía de haber más de un 50 por ciento de masa en el disco de la galaxia que la manifestada por las estrellas luminosas.

La investigación recibió un impulso decisivo en 1969. Jerry Ostriker, experto en la estabilidad de esferoides fluidos en rotación, había mostrado interés en las simulaciones de computador de las galaxias de disco, que ponían en juego un número ingente de partículas en interacción gravitatoria. Se percató de que, en tales simulaciones, los discos de partículas, que en un principio se creyó operaban contra la gravedad mediante la rotación (fuerzas centrífugas), no parecían comportarse así. Antes bien, los discos desarrollaban formas elongadas y estaban calientes; es decir, se acercaban más a sistemas calientes y sustentados por la presión que a sistemas en rotación. Lo que se hallaba en perfecta coherencia con los esferoides fluidos en rotación. Dicho de otro modo, resulta imposible construir un objeto tal sustentado enteramente por rotación, pues los sistemas dinámicos newtonianos sustentados por rotación son inestables. Entonces, ¿por qué se sustentaba la Vía Láctea por rotación y permanecía estable?

Ostriker sugirió que nuestra galaxia no se hallaría sustentada por la rotación, sino que el disco de rotación constituiría solo un componente de la galaxia, complementado por un segundo componente, esferoide, de masa igual a la del disco, un sistema que estaría además sustentado por la presión. Puesto que ese componente esferoide de gran masa no se había observado, debía de ser obscuro. ¿De qué se hallaría compuesto ese halo obscuro? Posiblemente de estrellas de baja luminosidad (enanas rojas) y restos de estrellas muertas (enanas blancas). ¿Había algún medio de detectarlas amén de la atracción gravitatoria? En aquella época nadie podía suponer que el halo pudiera constar de partículas subatómicas en interacción débil.

Las ideas de Ostriker se refinaron con la aportación de Jim Peebles. Juntos publicaron en 1973 el artículo que pudiera considerarse fundacional de la teoría sobre la materia obscura del universo. Las pruebas observacionales que respaldaban la idea de que unas galaxias espirales constaban de un componente importante y celado a la percepción se sucedieron en cascada.

Mort Roberts y Seth Shostak, centrados en la observación de la distribución y el movimiento del hidrógeno neutro en las regiones limítrofes de las galaxias a través de la línea espectral emitida por el hidrógeno en la longitud de onda de 21 centímetros, se percataron de que la velocidad rotacional del gas no decaía en función de la distancia del centro galáctico, que era lo esperable en una distribución de masas. La velocidad de rotación persistía constante allende la imagen visible de la galaxia. Un resultado que ratificaba la existencia de una discrepancia real entre masas visibles y dinámicas en las galaxias.

Los radioastrónomos comenzaron a realizar mediciones precisas de las curvas de rotación de las galaxias espirales, es decir, el giro adoptado por el gas en función de la distancia desde el centro. No se detectó que disminuyera la velocidad de rotación; antes bien, persistía constante

con la distancia. De ello se infería que el gas, allende incluso la luz de las galaxias, permanecía inmerso en la distribución de masas de la galaxia; en román paladino, la masa de las regiones exteriores de las galaxias era obscura.

Por su parte, Vera Rubin daba a conocer las mediciones de alta resolución de las curvas de rotación procedentes de observaciones espectroscópicas de las líneas de emisión ópticas. Se trataba de unas líneas de rotación que eran planas fuera de los límites ópticos de las galaxias espirales. Con todo, puesto que la velocidad de rotación no se medía allende la imagen óptica, no podían tomarse como una prueba contundente a favor de materia obscura.

También en los años setenta, se lanzaron satélites que podían observar el firmamento a longitudes de onda de rayos X (una radiación que no penetra en la atmósfera terrestre). Se descubrió que los cúmulos remotos de galaxias constituían fuentes poderosas de rayos X y que esa emisión era una radiación térmica dimanada de inmensos reservorios de gas caliente que inundaban los cúmulos. De hecho, la masa de gas superaba en general la masa de las estrellas de las galaxias en un factor de dos a tres. ¿Se trataba quizá de la masa ignota de Zwicky? Los cúmulos contenían por lo menos de cinco a seis veces más masa que la detectada en estrellas y gas. ¿Era esta materia obscura la misma que la de las galaxias individuales? Lo era y así se dio por supuesto.

Y lo que resultó decisivo. A finales de los años setenta se hizo patente que algo faltaba también a escala cosmológica. El modelo al uso del universo era el de un fluido homogéneo, isotrópico y en expansión. A macroescala, al menos. La radiación cósmica de fondo de microondas, descubierta en 1965 por Arno Penzias y Robert Wilson, refleja fluctuaciones de densidad en el fluido cósmico cuando la edad del universo era de 300.000 años, momento en que los protones y electrones empezaron a combinarse para crear hidrógeno neutro y la radiación se desacopló de la materia.

Todas las estructuras que observamos en el universo (estrellas, galaxias, cúmulos de galaxias y supercúmulos) se han formado en los últimos 14.000 millones de años por el desarrollo gravitatorio de fluctuaciones increíblemente pequeñas. Pero eso no parece posible en el marco de la teoría estándar sobre la inestabilidad gravitatoria. Una solución a ese problema era añadir materia obscura. Pero una clase especial de materia obscura: materia obscura no bariónica. Al hallarse desacoplado de la radiación, ese fluido de materia obscura puede comenzar a colapsarse antes que la materia normal bariónica, antes de la recombinación del hidrógeno. Con ello, la estructura observada se dispondría para constituirse a partir de fluctuaciones mínimas de densidad. Con mayor claridad: la materia obscura a escala cosmológica constituía un requisito imprescindible. Las fluctuaciones «perdidas» fueron encontradas por el COBE en 1992.

La materia obscura cosmológica es muy distinta de la imaginada para los halos que circundan las galaxias. No se trata de estrellas pequeñas o muertas, sino de partículas subatómicas. Tampoco son las partículas subatómicas ordinarias (protones, neutrones, etcétera), sino otras entidades que interaccionan muy débilmente, neutrinos quizás o incluso algo más exótico, que todavía no se ha detectado en los laboratorios terrestres. Por el mismo tiempo, la teoría de la física de partículas proseguía en su avance en la frontera del modelo estándar. Se iban proponiendo nuevas ideas sobre unificación de las fuerzas: gran unificación y, más tarde, la supersimetría. Las nuevas teorías aportaban una pléyade de partículas candidatas a materia obscura, sin desdeñar al neutrino.

Las partículas subatómicas poseen un atributo denominado espín, cuántico. En supersimetría, se requiere que cada partícula conocida del modelo estándar posea un socio supersimétrico que difiera en espín semientero. Por tanto, esa teoría dobla el número de partículas posibles. Solo una de esas partículas hipotéticas —el supersocio de masa menor— es estable y de vida larga; podría ser materia obscura. Una posibilidad que los físicos se proponen convertir en realidad con la demostración de la existencia de materia obscura.

En las postrimerías de los noventa se produjo otro punto de inflexión: no bastaba la materia obscura; a escala cosmológica se exige también «energía obscura». Por tal se entiende un fluido misterioso con una presión negativa que no se diluye a medida que el universo se expande y conduce a la expansión acelerada del universo. En la teoría einsteiniana de la gravedad, la relatividad general, la energía obscura queda incorporada en la constante cosmológica.

¿En qué situación nos encontramos? Hemos entrado ahora en la era de la cosmología de precisión. Podemos determinar la concentración de materia obscura en el universo. Conocemos la distribución de materia obscura en estructuras que abarcan de las galaxias enanas a los cúmulos de galaxias, gracias a simulaciones numéricas de alta resolución desarrolladas por modernos supercomputadores y también a observaciones de efecto lente. Contamos incluso con una idea bastante precisa de cómo se formó la Vía Láctea y de la abundancia local de materia obscura. Sabemos ya que la materia obscura constituye el 85 por ciento de toda la materia existente en el universo. Ignoramos su composición.

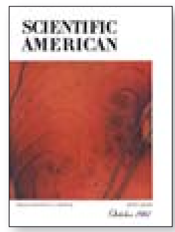
Entre los muchos candidatos propuestos destacan las partículas masivas que interaccionan débilmente (WIMP, de *weakly interacting massive particles*). Tras la puesta en funcionamiento del Gran Colisionador de Hadrones del CERN y una nueva generación de experimentos con astropartículas ha llegado el momento de la verdad para las WIMP.

Los físicos de partículas han propuesto decenas de candidatos posibles en el caso de la materia obscura. Se postuló la existencia de axiones, unas partículas hipotéticas, para resolver el problema de la CP fuerte en cromodinámica cuántica. Abundan las razones para considerarlas unos componentes verosímiles. Hemos aludido a los neutrinos. De todos los candidatos, sin embargo, la clase más estudiada es la de las WIMP. Su popularidad obedece a que vienen propuestas, por deducción natural, por teorías que generalizan el modelo estándar de la física de partículas en una teoría más fundamental.

Ya en 1983 se comprobó que una de las extensiones más prometedoras del modelo estándar, la mencionada supersimetría, aportaba un excelente candidato a la materia obscura: el neutralino. Esta partícula cumple todas las propiedades del buen candidato a materia obscura; con los años se ha convertido en ejemplo prototípico de WIMP. Su masa comprende de 50 gigaelectronvoltios a unos pocos teraelectronvoltios; su sección eficaz de interacción con la materia ordinaria y consigo mismo permite inferir que podría dar cuenta de toda la materia obscura del universo, al tiempo que persiste coherente con todos los experimentos conocidos.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Octubre 1961

Aire contaminado

«¿Representa la contaminación del aire una amenaza real para la salud pública? El primer lugar donde examinar los daños de un aire impuro serían las superficies corporales expuestas a él: la piel, que es resistente y se halla en su mayoría cubierta por ropa, y las vías respiratorias, que carecen de protección. Se ha demostrado que los trastornos habituales de los bronquios y los pulmones (la bronquitis crónica y el enfisema) están experimentando un alarmante aumento en algunos lugares. A la vez, no puede afirmarse, en el sentido legal o científico del término, que un determinado contaminante atmosférico sea el causante de la bronquitis, enfisema u otra afección broncopulmonar. Si la salud pública se resiente a causa de la ya generalizada polución atmosférica, los efectos deberían producirse en un gran número de personas. Pero debe de ser algo que sucede sin grandes manifestaciones individuales; de lo contrario, habría llamado la atención pública como una epidemia.»

Octubre 1911

Daños del granizo

«A falta de un método práctico para evitar los destructivos efectos del granizo, la población agrícola debe recurrir a los seguros para mitigar las pérdidas individuales. En el presente, sin embargo, el seguro contra el granizo, aunque ya aplicado hace más de un siglo, se fundamenta en una serie de datos de escasa fiabilidad. Solo en muy pocos países se recogen de forma sistemática estadísticas anuales acerca de las distribuciones espaciales y temporales de las granizadas. Durante el pasado año, el Instituto Internacional de Agricultura, en Roma, tomó las primeras medidas para mejorar la organización de los seguros contra el granizo y ampliar su cobertura a todos los países.»

Leche esterilizada

«En un Informe Consular Diario leemos una nota del cónsul Mahin de Ámsterdam, en la cual un boletín local se refiere a los efectos de los rayos ultravioleta sobre las bacterias y al hecho de que las lámparas incandescentes de mercurio producen ese tipo de radiación en gran cantidad. Se expone además que, por ese procedimiento, la leche puede ahora esterilizarse en pocos minutos. Se ha construido un aparato en el que la leche fluye por un conducto estrecho a lo largo de una luz eléctrica. Se dice que el agua se purifica en cuestión de pocos minutos sin un aumento apreciable de la temperatura.»

Guerra desde el aire

«Ante el rápido desarrollo de las aplicaciones militares y navales del aeroplano, nos conviene considerar del modo más serio posible el problema de la fortificación de las costas y del canal de Panamá. Nos gusta presumir de nuestro espléndido aislamiento, de los monstruos de cuellos de acero que vigilan la entrada a nuestros puertos. Pero supongamos que dentro de diez años todos los acorazados estén equipados con máquinas voladoras; o que aparezca una flota enemiga a cincuenta millas frente a Nueva York. ¿Necesitaría esta salvar los fuertes para destruir la metrópoli? Apenas; enviaría una flota de aeroplanos, que en una hora estaría sobre la ciudad, siguiendo las órdenes de su mando recibidas por radio, y al punto surgirían las llamas por doquier. ¿Fantasía? Quizá sí.»



El aeroplano desempeña nuevas funciones como arma de guerra sobre tierra y mar, 1911.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CV, Nº 16; 14 DE OCTUBRE DE 1911



Octubre 1861

La hora del té

«A consecuencia de la escasez de té en el sur, se dice que la población sureña está recuperando el yopon o yaupon (*Ilex cassine*), con el que los indios de Carolina del Norte confeccionaban su "bebida negra", y que desde entonces se ha seguido consumiendo en aquella región, aunque principalmente entre las clases más pobres. La planta crece en la costa desde Virginia hacia el sur, en especial en las islas de bajamar que encierra el estrecho de Pamlico. Los habitantes recolectan las hojas y las ramitas, y las truecan por maíz, fanega por fanega. Resulta revelador el hecho de que contenga el mismo principio que se halla en el té y en el café, conocido como *teína* o *cafeína*.»

La expedición al Ártico

«En medio de nuestras tribulaciones nacionales, el público parece haber olvidado la expedición a las regiones árticas del doctor Isaac Israel Hayes y sus compañeros en busca de información más concreta sobre el mar abierto polar, del que había dado cuenta el doctor Elisha Kane. Desde el otoño de 1860, cuando los exploradores se hallaban en Uppernavic, nada se ha sabido de ellos. En las sombrías regiones de las nieves perpetuas, esos heroicos americanos luchan para extender los conocimientos geográficos entre los icebergs del norte, totalmente ajenos a la más dolorosa lucha que ahora tiene lugar entre los hombres de su tierra natal.»

Al día siguiente de la impresión de esta nota, llegó la noticia telegrafiada desde Halifax de que el doctor Hayes había llegado sano y salvo a aquella ciudad sin haber logrado su propósito.

NÚMERO MONOGRÁFICO
CIUDADES

CIUDADES INTELIGENTES
ECOLOGÍA URBANA
CAMBIO CLIMÁTICO LOCAL
COMUNIDADES PERIFÉRICAS
EFICIENCIA ENERGÉTICA
LA ERA DE LOS RASCACIELOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza,
Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón,
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado,
Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Mark Fischetti,
Christine Gorman, Anna Kuchment,
Michael Moyer, George Musser, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley,
Graham P. Collins, John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS
Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER
MARKETING Christian Dorbandt
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 euros	100,00 euros
Dos años	120,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados
es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:

Yago Ascasibar: *¿Existe el multiverso?*; Luis Bou: *Técnicas para la estimulación del aprendizaje*; Fabio Teixidó: *Lecciones climáticas del Plioceno y El bosque de los cristales gigantes*; Carlos Lorenzo: *El origen de la longevidad*; Núria Comas y Xavier Espadaler: *Hormigas nómadas en la jungla*; Juan Manuel González Mañas: *Una bocanada de aire fresco*; Susana Urra: *Guardián de los faraones*; Ángel Garcimartín: *Cómo atrapar una onda*; Bruno Moreno: *Virus y síndrome de fatiga crónica y Apuntes*; Rolf Gaser: *Apuntes*; J. Vilardell: *Apuntes, Curiosidades de la física y Hace...*; Marián Beltrán: *Historia de la ciencia*

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España